



DISERTASI - MT143305

DESAIN DAN ANALISA SISTEM GERAK *AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE*

TEGUH HERLAMBAANG
NRP. 4113 301 001

Promotor	Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
Co-Promotor	Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D.

PROGRAM DOKTOR
PROGRAM PASCASARJANA TEKNOLOGI KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



DISERTASI - MT143305

**DESAIN DAN ANALISA SISTEM GERAK *AUTONOMOUS*
*UNDERWATER VEHICLE***

TEGUH HERLAMBAANG
NRP. 4113 301 001

Promotor	Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc, Ph.D.
Co-Promotor	Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D.

PROGRAM DOKTOR
PROGRAM PASCASARJANA TEKNOLOGI KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



DISSERTATION - MT143305

**DESIGN AND ANALYSIS OF MOTION SYSTEM *AUTONOMOUS*
*UNDERWATER VEHICLE***

TEGUH HERLAMBAANG

NRP. 4113 301 001

Promotor
Co-Promotor

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc, Ph.D.
Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D.

DOCTORAL PROGRAMME
POSTGRADUATE PROGRAMME OF MARINE TECHNOLOGY
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE TECHNOLOGY
SURABAYA
2016

HALAMAN PENGESAHAN

DESAIN DAN ANALISA SISTEM GERAK *AUTONOMOUS UNDERWATER* *VEHICLE*

Disertasi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Doktor (Dr)

Di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

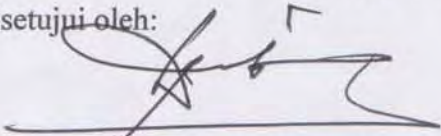
TEGUH HERLAMBA

NRP. 4113 301 001

Tanggal Ujian : 5 Agustus 2016


Periode Wisuda : September 2016

Disetujui oleh:

- 
1. **Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc, PhD** (Promotor)
NIP. 19581226 198403 1 002
 2. **Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing, PhD** (Co-Promotor)
NIP. 19751120 200212 1 002
 3. **Aries Sulisetyono, ST., MA.Sc., PhD** (Penguji Internal)
NIP. 19710320 199512 1 002
 4. **Subchan, M.Sc, Ph.D.** (Penguji Internal)
NIP. 19710513 199702 1 001
 5. **Dr. Daeng Paroka, ST., MT** (Penguji Eksternal)
NIP. 19720118 199002 1 001

Direktur Program Pascasarjana,




Prof. Ir. Djanhar Manfaat, M.Sc., Ph.D.

NIP. 19601202 198701 1 001

DESAIN DAN ANALISA SISTEM GERAK *AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE*

Oleh : Teguh Herlambang
NRP : 4113301001
Promotor : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
Co-Promotor : Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D.

ABSTRAK

Autonomous Underwater Vehicle (AUV) merupakan salah satu jenis robot bawah air yang relatif flexibel untuk eksplorasi bawah laut dan peralatan sistem pertahanan bawah laut. AUV dikendalikan dan dikemudikan oleh komputer di atas kapal pendukung untuk melaju dan bergerak dengan enam derajat kebebasan (6-DOF). Untuk mengendalikan dan mengemudikan AUV dibutuhkan sistem navigasi, panduan dan kendali gerak. Pada penelitian ini dikembangkan sistem navigasi, panduan dan kendali gerak menggunakan model linier *Segorogeni* AUV. Pemodelan diawali dengan penyusunan formulasi matematika gerakan AUV, berupa model non-linier 6-DOF yang selanjutnya dilakukan linierisasi model non-linier 6-DOF dengan matriks Jacobi. Model linier ini digunakan sebagai platform untuk mengembangkan sistem navigasi, panduan dan kendali gerak. Untuk menjaga akurasi posisi secara terus menerus diterapkan estimasi trajektori pada navigasi dan panduan AUV dengan metode estimasi, dengan metode estimasi Ensemble Kalman Filter (EnKF) dan Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR). Untuk menjaga kestabilan AUV diterapkan sistem kendali gerak dengan metode Proportional Integral Derivative (PID), Sliding Mode Control (SMC) dan Sliding PID (SPID).

Pada penelitian ini dibuat sepuluh kasus lintasan yang harus dilalui AUV. Lintasan pertama berupa gerakan maju lurus tanpa belok dan menyelam (*diving*), lintasan kedua adalah gerakan belok tanpa diving, lintasan ketiga yaitu gerakan diving tanpa belok, lintasan keempat merupakan gerakan belok dengan diving, lintasan kelima adalah gerakan memutar tanpa diving, lintasan keenam berupa gerakan memutar dengan diving, lintasan ketujuh yakni gerakan memutar ellips tanpa diving, lintasan kedelapan yaitu gerakan memutar ellips dengan diving, lintasan kesembilan adalah gerakan diving dan gerakan naik (*emerging*) tanpa belok, sedangkan lintasan kesepuluh merupakan gerakan diving dan emerging dengan belok. Berdasarkan metode yang dikembangkan, hasil simulasi menunjukkan bahwa metode navigasi dan panduan EnKF, EnKF-SR dan KF untuk model linier memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam memodelkan kesepuluh lintasan, dan tidak melebihi maksimal error posisi dari desain kriteria, yaitu 3.0%. Rata-rata error posisi untuk kesepuluh lintasan berkisar 0.1%-0.99%. Hasil simulasi menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, sehingga dapat disimpulkan bahwa implementasi dari metode-metode tersebut pada platform *Segorogeni* AUV telah dilakukan secara tepat. Berdasarkan pembangkitan ensemble, hasil simulasi sistem navigasi dan panduan dengan metode EnKF-SR memiliki tingkat akurasi yang lebih baik daripada EnKF dan KF untuk kesepuluh lintasan. Simulasi menggunakan metode EnKF-SR dengan membangkitkan 300 ensemble memiliki rata-rata akurasi yang lebih baik daripada dengan

membangkitkan 100, 200 atau 400 ensemble. Sedangkan berdasarkan lintasan kasus yang dibuat, hasil simulasi mendapatkan hasil yang baik dengan metode EnKF-SR.

Hasil simulasi sistem kendali dengan metode SMC dan SPID menunjukkan adanya error yang tidak jauh berbeda, yakni kurang dari 5%, serta memiliki *settling time* yang cukup cepat, yaitu sekitar 1.0 detik. Sedangkan metode PID mempunyai error yang lebih besar dari 5% dan *settling time* yang sangat lama, sekitar 60 – 80 detik. Hal ini berarti bahwa hasil kendali gerak dengan metode SMC dan SPID jauh lebih stabil daripada PID. Selanjutnya, analisa kestabilan yang dilakukan dengan metode Lyapunov terhadap keseluruhan metode kendali menunjukkan kondisi stabil asimtotik global.

Kata kunci : AUV, model linier, Ensemble Kalman Filter (EnKF), *Ensemble Kalman Filter Square Root* (EnKF), Kalman Filter (KF), Proportional Integral Derivative (PID), Sliding Mode Control (SMC), Sliding PID (SPID), Lyapunov.

DESIGN AND ANALYSIS OF MOTION SYSTEM AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

By : Teguh Herlambang
NRP : 4113301001
Promotor : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
Co-Promotor : Hendro Nurhadi, Dipl. Ing., Ph.D.

ABSTRACT

Autonomous Underwater Vehicle (AUV) is one type of underwater robot which is relatively flexible for undersea exploration and underwater defense systems. AUV is controlled and driven by computer on the support vessel to drive and move with six degrees of freedom (6-DOF). To control and navigate AUV, systems of guidance and motion control are required. In this research, the systems of navigation, guidance and motion control were developed using the linear model of Segorogeni AUV. The modeling began with mathematical formulation of AUV movement, in the form of non-linear models of 6-DOF, then the non-linear 6-DOF was linearized with Jacobi matrix. This linear model was used as a platform for developing navigation, guidance and motion control systems. To maintain the continuous accuracy of the position, estimation of trajectory was applied to the AUV navigation and guidance with the estimation method, Ensemble Kalman Filter (EnKF) and Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR). To maintain the stability of AUV, the motion control systems by the methods of Proportional Integral Derivative (PID), Sliding Mode Control (SMC) and Sliding PID (SPID) were applied.

In this research, ten trajectory cases to be passed by AUV were prepared. The first trajectory was forward straight movement without turning and diving. The second trajectory was the movement of turning without diving. The third trajectory was diving movement without turning. The fourth trajectory was turning movement without diving. The fifth trajectory was twisting movement without diving. The sixth trajectory was twisting movement with diving. The seventh trajectory was ellipse like twisting without diving. The eighth trajectory was ellipse-like twisting movement with diving. The ninth was diving and remerging movement without turning whereas the tenth trajectory was diving and emerging movement with turning. Based on the methods developed, the simulation results showed that the methods of navigation and guidance of EnKF, EnKF-SR and KF for the linear models had a high degree of accuracy in modeling the tent trajectories and did not exceed the position maximum error against the design criteria, which is 3.0%. The average error for the ten trajectories ranged from 0.1% - 0.99%. The simulation results showed a high degree of accuracy, so it could be concluded that the implementation of these methods on the platform of Segorogeni AUV was appropriately carried out.

Based ensemble generation, the simulation results showed that the navigation and guidance systems by EnKF-SR method demonstrated a higher accuracy than those by EnKF and KF for those ten trajectories. The simulations using EnKF-SR to generate 300 ensembles had an average accuracy, better than those by generating a 100, 200 or 400 ensembles. Whereas, based on the trajectory cases made, the simulation results showed that the good results were obtained by using EnKF-SR method.

The simulation results of the control system by applying the SMC and SPID methods demonstrated more or less similar error, for instance less than 5%, and a fairly fast settling time, which is about 1.0 seconds. While the application of PID method resulted in higher error, greater than 5% and the very long settling time, about 60-80 seconds. This means that the results of motion control by SMC and SPID methods were much more stable than those by PID. Furthermore, the stability analysis conducted by Lyapunov method to the overall control methods showed the global asymptotically stable condition.

Keywords: AUV, the linear model, Ensemble Kalman Filter (EnKF), Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF), Kalman Filter (KF), Proportional Integral Derivative (PID), Sliding Mode Control (SMC), Sliding PID (SPID), Lyapunov.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin, segala puji hanya bagi Allah SWT. Atas limpahan rahmat dan hidayahNya sehingga disertasi ini dapat diselesaikan dengan judul “**DESAIN DAN ANALISA SISTEM GERAK AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE**”. Disertasi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat akademik kelulusan Program Doktorat di Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Studi doktoral kami berlangsung dengan adanya beasiswa BPPDN dari Kementerian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi. Kiranya usaha penyusunan disertasi ini tidak mungkin akan berhasil tanpa adanya bantuan yang penulis peroleh, baik berupa doa, petunjuk, bimbingan, nasihat, motivasi serta fasilitas lain. Untuk itu kami mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada yang terhormat:

1. Bapak Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. dan Bapak Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D selaku tim pembimbing disertasi yang telah menyediakan banyak sekali waktu, tenaga dan pikiran untuk keberhasilan disertasi dengan memberikan bimbingan berupa saran dan masukan serta motivasi untuk menyelesaikan studi ini.
2. Tim penguji yaitu Bapak Dr. Daeng Paroka, S.T., M.T dari Fakultas Teknik, Universitas Hasanudian Makasar, Bapak Subchan, M.Sc, Ph.D dari Fakultas Matematika dan Pengetahuan Alam, ITS, Bapak Aries Sulisetyono, ST., MA.Sc.,PhD dari Fakultas Teknologi Kelautan, ITS.
3. Seluruh Pimpinan dan Bapak Ibu Dosen di Universitas Nahdlatul Ulama Surabaya (UNUSA).
4. Bapak Dr. Raja Oloan Saut Gurning beserta segenap staf pengelola Program Pascasarjana Teknik Kelautan (PPSTK) ITS.
5. Orang tuaku tercinta Ibu Rochani Oedjiati dan Almarhum Bapak Bambang Isbandoko yang telah membesarkan dan mendidik penulis dengan penuh kesabaran dan pengorbanan yang tiada terkira. Penulis yakin disertasi ini sebagai bukti bahwa doa, cinta dan kasih sayangnya senantiasa melekat pada diri penulis sampai saat ini.

6. Bapak dan Ibu Mertuaku yang selalu memberikan dukungan dan doa.
7. Istriku Ike Sopiya yang telah menemani dan sumber motivasi selama studi ini.
8. Kedua anakku, Unggul Doctorrizq Herlambang dan Prestasia Doctorrizq Herlambang sebagai penghibur ayah ketika jenuh mengerjakan disertasi
9. Mbak Nila, Mas Arif dan Dek Yuli serta keponakanku Emily yang selalu memberikan dukungan.
10. Teman-teman S3 PPSTK ITS Angkatan 2013 yang telah memberi semangat dan motivasi sehingga disertasi ini dapat diselesaikan.

Penulis menyadari bahwa selama masa penelitian dan penyusunan laporan ini masih banyak kekurangan dan kesalahan. Oleh karena itu penulis memohon saran dan kritik dari berbagai pihak yang bersifat membangun sebagai bahan perbaikan di masa yang akan datang. Semoga disertasi ini bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Agustus 2016

Penulis

DAFTAR ISI

JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xlii
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR NOTASI	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 RUMUSAN MASALAH	7
1.3 TUJUAN PENELITIAN	7
1.4 BATASAN MASALAH	8
1.5 ORIGINALITAS	8
1.6 MANFAT PENELITIAN DAN KONTRIBUSI.....	8
1.7 SISTEMATIKA PENULISAN	9
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	11
2.1 PEMBAHASAN PENELITIAN TERDAHULU	11
2.1.1 Penelitian Terdahulu tentang Pemodelan Gerakan AUV.....	11
2.1.2 Penelitian Terdahulu tentang Sistem Navigasi dan Panduan AUV	18
2.1.3 Penelitian Terdahulu tentang Sistem Kendali Gerak AUV.....	24
2.2 DASAR TEORI MODEL GERAKAN AUV	37
2.2.1 Gaya Luar dan Momen.....	41

2.2.2 Total Gaya dan Momen.....	46
2.2.3 Transformasi Posisi.....	47
2.2.4 Linierisasi.....	48
2.3 SISTEM NAVIGASI DAN PANDUAN.....	49
2.3.1 Metode Kalman Filter.....	49
2.3.2 Metode Ensemble Kalman Filter.....	51
2.3.3 Metode Ensemble Kalman Filter Square Root.....	53
2.3.4 Metode Beda Hingga.....	55
2.4 SISTEM PENGENDALIAN.....	56
2.4.1 Proportional Integral Derivatif (PID).....	59
2.4.2 Sliding Mode Control (SMC).....	60
2.4.3 Sliding PID.....	64
2.5 KETERKONTROLAN DAN KETERAMATAN.....	65
2.5.1 Keterkontrolan.....	65
2.5.2 Keteramatan.....	65
2.6 ANALISA KESTABILAN LYAPUNOV.....	66
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	67
3.1 TAHAP PENELITIAN.....	68
3.2 TAHAP PENELITIAN SISTEM NAVIGASI DAN PANDUAN.....	71
3.3 TAHAP PENELITIAN SISTEM KENDALI GERAK.....	75
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	79
4.1 LINIERISASI MODEL NON-LINIER.....	79
4.2 KOMPUTASI KOEFISIEN HIDRODINAMIKA.....	84
4.2.1 Massa Tambah.....	85
4.2.2 Gaya Angkat.....	86
4.2.3 Gaya Hambatan.....	87

4.2.4 Gaya Hidrostatik.....	86
4.2.5 Gaya Dorong	87
4.3 KETERKONTROLAN DAN KETERAMATAN.....	89
4.3.1 Keterkontrolan.....	89
4.3.2 Keteramatan	89
4.4 DISKRITISASI MODEL LINIER AUV	90
4.5 PENAMBAHAN FAKTOR STOKASTIK	91
4.6 PROSEDUR IMPLEMENTASI MODEL PADA ALGORITMA ENKF	91
4.7 HASIL SIMULASI DAN ANALISA SISTEM NAVIGASI DAN PANDUAN	93
4.7.1 Simulasi untuk Gerakan Lurus.....	96
4.7.2 Simulasi untuk Gerakan Belok	99
4.7.3 Simulasi untuk Gerakan Diving.....	103
4.7.4 Simulasi untuk Gerakan Belok dan Diving.....	108
4.7.5 Simulasi untuk Gerakan Memutar	113
4.7.6 Simulasi untuk Gerakan Memutar dan Diving	117
4.7.7 Simulasi untuk Gerakan Memutar Ellips	122
4.7.8 Simulasi untuk Gerakan Memutar Ellips dan Diving	126
4.7.9 Simulasi untuk Gerakan Diving dan Emerging	131
4.7.10 Simulasi untuk Gerakan Diving , Emerging dan Belok.....	136
4.8 PERANCANGAN SISTEM KENDALI	141
4.8.1 Perancangan Sistem Kendali PID pada Model Linier 6-DOF	143
4.8.2 Perancangan Sistem Kendali SMC dan SPID pada Model Linier 6-DOF.....	144
4.8.3 Hasil Simulasi Sistem Kendali PID, SMC dan SPID	156
4.9 Analisa Kestabilan Lyapunov	165

4.9.1 Analisa Kestabilan Lyapunov Sistem Kendali SMC	165
4.9.2 Analisa Kestabilan Lyapunov Sistem Kendali PID	167
4.9.3 Analisa Kestabilan Lyapunov Sistem Kendali SPID	171
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	175
Daftar Pustaka	179
LAMPIRAN A1. Perbandingan Nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF Dengan Membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 Ensemble . A1.1	
LAMPIRAN A2. Perbandingan Nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR	A2.1
LAMPIRAN A3. Perbandingan Nilai RMSE antara EnKF dan KF	A3. 1
LAMPIRAN A4. Perbandingan Nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF	A4. 1
LAMPIRAN A5. Perbandingan Nilai RMSE dengan EnKF pada Sepuluh Lintasan	A5. 1
LAMPIRAN A6. Perbandingan Nilai RMSE dengan EnKF pada Sepuluh Lintasan	A6. 1
LAMPIRAN B. GUI Interface dari Sistem Navigasi dan Panduan	B. 1
LAMPIRAN C. Pembuktian Kprop	C. 1
LAMPIRAN D. Potongan Video Representasi Simulasi 10 Lintasan	D. 1
LAMPIRAN E. Dokumentasi Publikasi	E. 1
LAMPIRAN F. Riwayat Hidup Penulis	F. 1

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Critical review jurnal terkait pemodelan matematika gerakan AUV.....	13
Tabel 2.2. Critical review jurnal terkait sistem navigasi dan panduan AUV.....	20
Tabel 2.3. Critical review jurnal terkait sistem kendali gerak AUV.....	27
Tabel 2.4. Notasi koordinat AUV (SNAME)	38
Tabel 2.5. Algoritma Kalman Filter (Kalman,1960).....	51
Tabel 2.6. Algoritma Ensemble Kalman Filter (Evensen,2009).....	53
Tabel 2.7. Algoritma Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR) (Herlambang,2012).....	54
Tabel 3.1. Spesifikasi dari <i>Segorogeni</i> AUV	70
Tabel 4.1. Nilai komponen Jacobi matriks A.....	82
Tabel 4.2. Nilai komponen Jacobi matriks B	83
Tabel 4.3. Nilai parameter pada AUV	85
Tabel 4.4. Nilai paramater pada tail AUV	86
Tabel 4.5. Perbandingan nilai rata-rata RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF Berdasarkan gerak lurus dengan membangkitkan 300 ensemble	98
Tabel 4.6. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak lurus	99
Tabel 4.7. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak lurus	99
Tabel 4.8. Perbandingan nilai rata-rata RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF Berdasarkan gerak belok dengan membangkitkan 300 ensemble	102
Tabel 4.9. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak belok	103

Tabel 4.10. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak belok	104
Tabel 4.11. Perbandingan nilai rata-rata RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF Berdasarkan gerak <i>diving</i> dengan membangkitkan 300 ensemble	107
Tabel 4.12. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak <i>diving</i>	107
Tabel 4.13. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak belok	108
Tabel 4.14. Perbandingan nilai rata-rata RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF Berdasarkan gerak belok dan <i>diving</i> dengan membangkitkan 300 ensemble	111
Tabel 4.15. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak belok dan <i>diving</i>	112
Tabel 4.16. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak belok dan <i>diving</i>	112
Tabel 4.17. Perbandingan nilai rata-rata RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF Berdasarkan gerak memutar dengan membangkitkan 300 ensemble..	115
Tabel 4.18. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak memutar	116
Tabel 4.19. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak memutar	117

Tabel 4.20. Perbandingan nilai rata-rata RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF Berdasarkan gerak memutar dan <i>diving</i> dengan membangkitkan 300 ensemble	120
Tabel 4.21. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak memutar dan <i>diving</i>	121
Tabel 4.22. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak memutar dan <i>diving</i>	121
Tabel 4.23. Perbandingan nilai rata-rata RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF Berdasarkan gerak memutar Ellips dengan membangkitkan 300 ensemble	124
Tabel 4.24. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak memutar Ellips.....	125
Tabel 4.25. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak memutar Ellips.....	126
Tabel 4.26. Perbandingan nilai rata-rata RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF Berdasarkan gerak memutar Ellips dan <i>diving</i> dengan membangkitkan 300 ensemble	129
Tabel 4.27. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak memutar Ellips dan <i>diving</i>	130
Tabel 4.28. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak memutar Ellips dan <i>diving</i>	130

Tabel 4.29. Perbandingan nilai rata-rata RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF Berdasarkan gerak <i>diving</i> dan <i>emerging</i> dengan membangkitkan 300 ensemble	133
Tabel 4.30. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak <i>diving</i> dan <i>emerging</i>	134
Tabel 4.31. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak <i>diving</i> dan <i>emerging</i>	135
Tabel 4.32. Perbandingan nilai rata-rata RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF Berdasarkan gerak <i>diving</i> , <i>emerging</i> dan belok dengan membangkitkan 300 ensemble	138
Tabel 4.33. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak <i>diving</i> , <i>emerging</i> dan belok	139
Tabel 4.34. Perbandingan nilai rata-rata RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerak <i>diving</i> , <i>emerging</i> dan belok	139
Tabel 4.35. nilai <i>Proportional, Integral, Derivative</i> dari PID default dan identik ..	143
Tabel 4.36. Spesifikasi Respon <i>Transient</i> pada Gerak Surge	161
Tabel 4.37. Spesifikasi Respon <i>Transient</i> pada Gerak Sway.....	161
Tabel 4.38. Spesifikasi Respon <i>Transient</i> pada Gerak Heave	162
Tabel 4.39. Spesifikasi Respon <i>Transient</i> pada Gerak Roll.....	162
Tabel 4.40. Spesifikasi Respon <i>Transient</i> pada Gerak Pitch	163
Tabel 4.41. Spesifikasi Respon <i>Transient</i> pada Gerak Yaw	163
Tabel 5.1. rata - rata Error Posisi	176

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. a. NDRE AUV, b. HUGIN 1 AUV	2
Gambar.1.2. a. NDRE 3000 AUV, b. HUGIN 1000 AUV	2
Gambar 1.3. a. NPS ARIES AU, b. <i>Bluefin Robotics</i> AUV	3
Gambar 1.4. REMUS AUV	3
Gambar 2.1. Enam derajat kebebasan gerak AUV (Yang,2007)	38
Gambar.2.2. Diagram blok Sederhana dari sistem loop terbuka dan loop tertutup ...	57
Gambar 2.3. Spesifikasi respon transien (Ogata,2010).....	59
Gambar 2.4. Blok diagram kontroller PID.....	60
Gambar 2.5. Kondisi sliding (Perruquetti dan Barbot, 2002)	62
Gambar 2.6. Kondisi chattering (Perruquetti dan Barbot, 2002)	63
Gambar 2.7. Blok diagram SPID	64
Gambar.3.1. Diagram alir penelitian.....	67
Gambar 3.2. Profil <i>Segorogeni</i> AUV	70
Gambar.3.3. Diagram alir sistem navigasi dan panduan.....	72
Gambar 3.4. Diagram alir penerapan EnKF, EnKF-SR dan KF.....	73
Gambar 3.5. Diagram alir sistem kendali gerak.....	75
Gambar 3.6. Diagram alir metode SMC	76
Gambar 3.7. Diagram alir metode PID	77
Gambar 3.8. Diagram alir metode SPID	78
Gambar 4.1. Penampang AUV	84
Gambar 4.2. Penampang tail AUV	86
Gambar 4.3. Gaya Lift dan drag pada bidang Longitudinal	87
Gambar 4.4. Estimasi posisi berdasarkan gerakan lurus pada bidang XY.....	96
Gambar 4.5. Estimasi posisi berdasarkan gerakan lurus pada bidang XZ.....	97
Gambar 4.6. Estimasi posisi berdasarkan gerakan lurus pada bidang XYZ.....	97
Gambar 4.7. Estimasi posisi berdasarkan gerakan belok pada bidang XY.....	100
Gambar 4.8. Estimasi posisi berdasarkan gerakan belok pada bidang XZ.....	101

Gambar 4.9. Estimasi posisi berdasarkan gerakan belok pada bidang XYZ.....	102
Gambar 4.10. Estimasi posisi berdasarkan gerakan <i>diving</i> pada bidang XY	105
Gambar 4.11. Estimasi posisi berdasarkan gerakan <i>diving</i> pada bidang XZ	105
Gambar 4.12. Estimasi posisi berdasarkan gerakan <i>diving</i> pada bidang XYZ.....	106
Gambar 4.13. Estimasi posisi berdasarkan gerakan belok dan <i>diving</i> pada bidang XY	109
Gambar 4.14. Estimasi posisi berdasarkan gerakan belok dan <i>diving</i> pada bidang XZ.....	109
Gambar 4.15. Estimasi posisi berdasarkan gerakan belok dan <i>diving</i> pada bidang XYZ.....	110
Gambar 4.16. Estimasi posisi berdasarkan gerakan memutar pada bidang XY.....	113
Gambar 4.17. Estimasi posisi berdasarkan gerakan memutar pada bidang XZ	114
Gambar 4.18. Estimasi posisi berdasarkan gerakan memutar pada bidang XYZ	115
Gambar 4.19. Estimasi posisi berdasarkan gerakan memutar dan <i>diving</i> pada bidang XY	118
Gambar 4.20. Estimasi posisi berdasarkan gerakan memutar dan <i>diving</i> pada bidang XZ	119
Gambar 4.21. Estimasi posisi berdasarkan gerakan memutar dan <i>diving</i> pada bidang XYZ.....	119
Gambar 4.22. Estimasi posisi berdasarkan gerakan memutar memutar pada bidang XY	122
Gambar 4.23. Estimasi posisi berdasarkan gerakan memutar memutar pada bidang XZ	123
Gambar 4.24. Estimasi posisi berdasarkan gerakan memutar memutar pada bidang XYZ	124
Gambar 4.25. Estimasi posisi berdasarkan gerakan memutar memutar dan <i>diving</i> pada bidang XY	127
Gambar 4.26. Estimasi posisi berdasarkan gerakan memutar memutar dan <i>diving</i> pada bidang XZ.....	128

Gambar 4.27. Estimasi posisi berdasarkan gerakan memutar memutar dan <i>diving</i> pada bidang XYZ.....	128
Gambar 4.28. Estimasi posisi berdasarkan gerakan <i>diving</i> dan <i>emergng</i> pada bidang XY.....	131
Gambar 4.29. Estimasi posisi berdasarkan gerakan <i>diving</i> dan <i>emergng</i> pada bidang XZ.....	132
Gambar 4.30. Estimasi posisi berdasarkan gerakan <i>diving</i> dan <i>emergng</i> pada bidang XYZ.....	133
Gambar 4.31. Estimasi posisi berdasarkan gerakan <i>diving</i> , <i>emerging</i> dan belok pada bidang XY.....	136
Gambar 4.32. Estimasi posisi berdasarkan gerakan <i>diving</i> , <i>emerging</i> dan belok pada bidang XZ.....	137
Gambar 4.33. Estimasi posisi berdasarkan gerakan <i>diving</i> , <i>emergng</i> dan belok pada bidang XYZ.....	137
Gambar 4.34. Diagram Blok AUV	141
Gambar 4.35. Diagram Blok Subsistem AUV	141
Gambar 4.36. Respon gerak Tanslasi Tanpa sistem kendali.....	142
Gambar 4.37. Respon gerak Rotasi Tanpa sistem kendali.....	142
Gambar 4.38. Diagram Blok AUV dengan sistem kendali PID	143
Gambar 4.39. Diagram Blok AUV dengan sistem kendali SMC	155
Gambar 4.40. Diagram Blok AUV dengan sistem kendali SPID	155
Gambar 4.41a. Respon surge dengan sistem kendali PID default dan identik	156
Gambar 4.41b. Respon surge dengan sistem kendali SMC dan SPID.....	156
Gambar 4.42a. Respon sway dengan sistem kendali PID default dan identik.....	157
Gambar 4.42b. Respon sway dengan sistem kendali SMC dan SPID	157
Gambar 4.43a. Respon heave dengan sistem kendali PID default dan identik.....	157
Gambar 4.43b. Respon heave dengan sistem kendali SMC dan SPID	157
Gambar 4.44a. Respon roll dengan sistem kendali PID default dan identik.....	158
Gambar 4.44b. Respon roll dengan sistem kendali SMC dan SPID.....	158

Gambar 4.45 a. Respon pitch dengan sistem kendali PID default dan identik	159
Gambar 4.45 b. Respon pitch dengan sistem kendali SMC dan SPID	159
Gambar 4.46 a. Respon yaw dengan sistem kendali PID default dan identik	160
Gambar 4.46 b. Respon yaw dengan sistem kendali SMC dan SPID	160

DAFTAR NOTASI

Daftar Istilah

AUV	: Autonomous Underwater Vehicle
BFF	: Body Fixed Frame
DOF	: Degree of Freedom (Derajat Kebebasan)
EFF	: Earth Fixed Frame
EnKF	: Ensemble Kalman Filter
EnKF-SR	: Ensemble Kalman Filter Square Root
PID	: Proportional Integral Derivatif
SMC	: Sliding Mode Control
SPID	: Sliding PID
SVD	: Singular Value Decomposition

Daftar Notasi Pemodelan AUV

u	: Kecepatan Linear pada sumbu x (Surge)
v	: Kecepatan Linear pada sumbu y (Sway)
w	: Kecepatan Linear pada sumbu z (Heave)
p	: Kecepatan Linear pada sumbu x (Roll)
q	: Kecepatan Linear pada sumbu y (Pitch)
r	: Kecepatan Linear pada sumbu z (Yaw)
$\eta = [\eta_1^T, \eta_2^T]^T$: Vektor posisi linear dan anguler terhadap BFF
$\eta_1 = [x, y, z]^T$: Vektor posisi linear pada sumbu x, y, z terhadap BFF
$\eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$: Vektor posisi anguler pada sumbu x, y, z terhadap BFF
$v = [v_1^T, v_2^T]^T$: Vektor kecepatan linear dan anguler terhadap BFF
$v_1 = [u, v, w]^T$: Vektor kecepatan linear pada sumbu x, y, z terhadap BFF
$v_2 = [p, q, r]^T$: Vektor kecepatan anguler pada sumbu x, y, z terhadap BFF
$\tau = [\tau_1^T, \tau_2^T]^T$: Gaya dan moemmn yang diterima body terhadap BFF
$\tau_1 = [X, Y, Z]^T$: Gaya yang diterima body pada sumbu x, y, z terhadap BFF
$\tau_2 = [K, M, N]^T$: Momen yang diterima body pada sumbu x, y, z terhadap BFF
a_{offset}	: Ketebalan nose
c_{offset}	: Ketebalan tail

A_1, A_2, \dots, A_6	: Turunan fungsi surge terhadap control input masing-masing DOF pada matriks Jacobi
B_1, B_2, \dots, B_6	: Turunan fungsi sway terhadap control input masing-masing DOF pada matriks Jacobi
C_1, C_2, \dots, C_6	: Turunan fungsi heave terhadap control input masing-masing DOF pada matriks Jacobi
C_L	: Koefisien Lift
C_D	: Koefisien Drag
D_1, D_2, \dots, D_6	: Turunan fungsi roll terhadap control input masing-masing DOF pada matriks Jacobi
E_1, E_2, \dots, E_6	: Turunan fungsi pitch terhadap control input masing-masing DOF pada matriks Jacobi
G_1, G_2, \dots, G_6	: Turunan fungsi yaw terhadap control input masing-masing DOF pada matriks Jacobi
a_1, a_2, \dots, a_6	: Turunan fungsi surge terhadap masing-masing DOF pada matriks Jacobi
b_1, b_2, \dots, b_6	: Turunan fungsi sway terhadap masing-masing DOF pada matriks Jacobi
c_1, c_2, \dots, c_6	: Turunan fungsi heave terhadap masing-masing DOF pada matriks Jacobi
d_1, d_2, \dots, d_6	: Turunan fungsi roll terhadap masing-masing DOF pada matriks Jacobi
D	: Gaya Drag
e_1, e_2, \dots, e_6	: Turunan fungsi pitch terhadap masing-masing DOF pada matriks Jacobi
f_1, f_2, \dots, f_6	: Fungsi dari surge, sway, heave, roll, pitch dan yaw untuk linearisasi menggunakan matriks jacobi
g_1, g_2, \dots, g_6	: Turunan fungsi yaw terhadap masing-masing DOF pada matriks Jacobi
L	: Gaya lift
$L_1, L_2, L_3, \dots, L_{36}$: hasil perkalian yang menghasilkan matriks A dalam model linier AUV
X_{res}	: Gaya hidrostatis untuk gerak surge
Y_{res}	: Gaya hidrostatis untuk gerak sway
Z_{res}	: Gaya hidrostatis untuk gerak heave

K_{res}	: Gaya hidrostatik untuk gerak roll
M_{res}	: Gaya hidrostatik untuk gerak pitch
N_{res}	: Gaya hidrostatik untuk gerak yaw
X_{uu}	: Gaya drag untuk gerak surge
Y_{vv}	: Gaya drag untuk gerak sway
Y_{rr}	: Gaya drag untuk gerak pitch
Z_{ww}	: Gaya drag untuk gerak heave
Z_{qq}	: Gaya drag untuk gerak pitch
K_{pp}	: Gaya drag untuk gerak roll
M_{ww}	: Gaya drag untuk gerak heave
M_{qq}	: Gaya drag untuk gerak pitch
N_{vv}	: Gaya drag untuk gerak sway
N_{rr}	: Gaya drag untuk gerak yaw
$X_{\dot{u}}$: Added Mass untuk gerak surge
$X_{w\dot{q}}$: Added Mass untuk gerak surge
$X_{q\dot{q}}$: Added Mass untuk gerak surge
$X_{v\dot{r}}$: Added Mass untuk gerak surge
$X_{r\dot{r}}$: Added Mass untuk gerak surge
X_{prop}	: Gaya Dorong
$Y_{\dot{v}}$: Added Mass untuk gerak sway
$Y_{\dot{r}}$: Added Mass untuk gerak sway
$Y_{u\dot{r}}$: Added Mass untuk gerak sway
$Y_{w\dot{p}}$: Added Mass untuk gerak sway
$Y_{p\dot{q}}$: Added Mass untuk gerak sway
Y_{uv}	: Body Lift Force dan Fin Lift
$Y_{uu} \delta_r$: Fin Lift Force
δ_r	: Sudut Rudder
$Z_{\dot{w}}$: Added Mass untuk gerak heave
$Z_{\dot{q}}$: Added Mass untuk gerak heave
$Z_{u\dot{q}}$: Added Mass untuk gerak heave
$Z_{v\dot{p}}$: Added Mass untuk gerak heave
$Z_{r\dot{p}}$: Added Mass untuk gerak heave
Z_{uw}	: Body Lift Force dan Fin Lift

$Z_{uu} \delta_s$: Fin Lift Force
δ_s	: Sudut Fin
$K_{\dot{p}}$: Added Mass momen inersia untuk gerak roll
K_{prop}	: Moment Dorong
$M_{\dot{w}}$: Added Mass momen inersia untuk gerak pitch
$M_{\dot{q}}$: Added Mass momen inersia untuk gerak pitch
M_{uq}	: Added Mass momen inersia untuk gerak pitch
M_{vp}	: Added Mass momen inersia untuk gerak pitch
M_{rp}	: Added Mass momen inersia untuk gerak pitch
M_{uw}	: Body dan lift momen
$M_{uu} \delta_s$: fin lift moment
$N_{\dot{v}}$: Added Mass momen inersia untuk gerak yaw
$N_{\dot{r}}$: Added Mass momen inersia untuk gerak yaw
N_{ur}	: Added Mass momen inersia untuk gerak yaw
N_{wp}	: Added Mass momen inersia untuk gerak yaw
N_{pq}	: Added Mass momen inersia untuk gerak yaw
N_{uv}	: Body dan lift momen
$N_{uu} \delta_r$: fin lift moment
m_a	: Formulasi added mass per satuan panjang silinder
m_{af}	: Formulasi added mass pada tail
S_{fin}	: Luas area fin
S_{body}	: Luas area body
x_{fin}	: jarak antara pusat koordinat AUV dan pusat tekanan fin
V_{fin}	: kecepatan efektif dari fin
ρ	: massa jenis fluida
C_{RB}	: matriks coriolis dan sentripetal
M_{RB}	: matriks inersia
x_G, y_G, z_G	: posisi dari pusat massa pada koordinat BFF
x_b, y_b, z_b	: posisi dari pusat gaya apung dalam koordinat BFF
$R_n(x)$: Fungsi distribusi bagian nose
$R_m(x)$: Fungsi distribusi bagian middle
$R_t(x)$: Fungsi distribusi bagian tail
S_{n5}, S_{n6}, S_{n7}	: Tiga parameter karakteristik dari nose

S_{t5}, S_{t6}, S_{t7} : Tiga parameter karakteristik dari nose

Daftar Notasi Sistem Navigasi dan Panduan

x_0	: inisial dari sistem
x_k	: variable keadaan pada waktu k
x_{k+1}	: variable keadaan pada waktu $k+1$
u_k	: vektor masukan deterministik pada waktu k
w_k	: noise pada sistem
z_k	: variabel pengukuran
v_k	: noise pada pengukuran
H	: Matriks data pengukuran
N	: Banyaknya Ensemble
Q_k	: noise pada sistem
R_k	: noise pada pengukuran
\hat{x}_k^-	: Estimasi pada tahap prediksi EnKF
P_k^-	: Kovarian error pada tahap prediksi EnKF
K_k	: Kalman Gain
$\hat{x}_{k,i}$: Estimasi pada tahap koreksi EnKF
P_k	: Kovarian error pada tahap koreksi EnKF
I	: Matriks identitas
U, V	: Matriks ortogonal
λ	: Nilai Eigen
$\bar{x}_{0,i}$: Mean <i>Ensemble</i> awal (pada EnKF-SR)
$\tilde{x}_{0,i}$: <i>Ensemble</i> error awal (pada EnKF-SR)
$\bar{x}_{k,i}^-$: Mean <i>Ensemble</i> pada tahap prediksi
$\tilde{x}_{k,i}^-$: Error <i>Ensemble</i> pada tahap prediksi
$\bar{x}_{k,i}$: Mean <i>Ensemble</i> pada tahap koreksi
$\tilde{x}_{k,i}$: Error <i>Ensemble</i> pada tahap koreksi
Δt	: Selang waktu (t_2-t_1)

k	: iterasi
Λ	: Matriks akar kuadrat

Daftar Notasi Sistem Kendali Gerak

d	: gangguan pada sistem
e	: <i>tracking error</i>
u_c	: control input
y	: keluaran sistem
C	: Sistem Pengendali
P	: Plant
t_d	: waktu tunda (<i>delay time</i>)
t_r	: waktu naik
t_p	: waktu puncak
t_s	: waktu penetapan (<i>settling time</i>)
x	: vektor keadaan
x_d	: x yang diinginkan
$S(x, t)$: fungsi <i>switching</i>
λ	: konstanta positif pada fungsi <i>switching</i>
η	: konstanta positif pada kondisi <i>reaching</i>
ϕ	: <i>Boundary layer</i>
$V(x)$: Fungsi kandidat Lyapunov
$S(u, t)$: Fungsi Switching untuk Surge pada model linear 6 DOF
$S(v, t)$: Fungsi Switching untuk Sway pada model linear 6 DOF
$S(w, t)$: Fungsi Switching untuk Heave pada model linear 6 DOF
$S(p, t)$: Fungsi Switching untuk Roll pada model linear 6 DOF
$S(q, t)$: Fungsi Switching untuk Pitch pada model linear 6 DOF
$S(r, t)$: Fungsi Switching untuk Yaw pada model linear 6 DOF
K_1	: Nilai Konstanta pada Kondisi Sliding untuk Surge pada model linier 6 DOF
K_2	: Nilai Konstanta pada Kondisi Sliding untuk Sway pada model linier 6 DOF

- K_3 : Nilai Konstanta pada Kondisi Sliding untuk Heave pada model linier 6 DOF
- K_4 : Nilai Konstanta pada Kondisi Sliding untuk Roll pada model linier 6 DOF
- K_5 : Nilai Konstanta pada Kondisi Sliding untuk Pitch pada model linier 6 DOF
- K_6 : Nilai Konstanta pada Kondisi Sliding untuk Yaw pada model linier 6 DOF

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

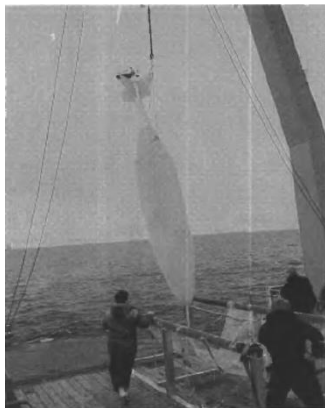
Autonomous Underwater Vehicle (AUV) atau secara umum disebut kapal selam tanpa awak adalah merupakan salah satu jenis robot bawah air yang telah menarik minat banyak penelitian beberapa tahun terakhir. AUV adalah kendaraan yang dapat bergerak dalam enam derajat kebebasan serta melaju di dalam air menggunakan sistem propulsi, dikendalikan dan dikemudikan oleh operator dengan bantuan komputer di atas kapal pendukung. AUV relatif flexibel untuk observasi lautan karena tidak membutuhkan kabel dan dapat berenang dengan bebas tanpa hambatan (Kondo dan Ura, 2014). AUV pertama kali dibuat oleh *Applied Physics Laboratory (APL)* di University of Washington, USA, pada akhir 1950-an karena kebutuhan untuk mendapatkan data oseanografi. Penelitian yang dilakukan di laboratorium tersebut mengarah pada pengembangan dan pengoperasian *Self Propelled Underwater Vehicle Research (SPURV)*. Kemudian perkembangan AUV dapat dibagi menjadi beberapa tahap, yaitu pada tahap pertama tahun 1970an, dilakukan penyelidikan awal kegunaan sistem AUV, pada tahap kedua tahun 1970 – 1980 dibangun pengembangan teknologi dan eksperimen AUV, pada tahap ketiga tahun 1980 – 1990 dilakukan percobaan dengan menggunakan prototipe, pada tahap keempat tahun 1990 – 2000 pengembangan AUV berbasis TIK. Sejak tahun 2000, AUV telah berkembang menjadi produk komersil (Yang, 2007).

Bersamaan dengan perkembangan teknologi AUV, area aplikasinya telah meluas secara bertahap, meliputi bidang-bidang berikut:

- Ilmu Pengetahuan: pemetaan dasar laut, sampel geologi, pemantau oseanografi
- Lingkungan: inspeksi struktur bawah air, termasuk pipa, bendungan, dll; pemantauan jangka panjang sebagai misal radiasi dan kebocoran serta rehabilitasi lingkungan.
- Industri minyak dan gas: survei laut dan penilaian sumber daya, konstruksi dan pemeliharaan struktur bawah air.

- Militer: peralatan sistem pertahanan bawah laut

Beberapa penelitian dan pengembangan AUV pada tahun 1990 – 2000, di antaranya NDRE AUV, HUGIN AUV, REMUS AUV, NPS ARIES AUV dan Bluefin Robotics AUV. NDRE AUV dan HUGIN AUV dikembangkan oleh *Norwegian Defence Research Establishment* (NDRE) pada tahun 1990an untuk kebutuhan penelitian, monitoring bawah laut dan kebutuhan militer. NDRE AUV sudah diuji di laut antara Norwegia dan Denmark. HUGIN AUV dikembangkan secara berkelanjutan sehingga didapat HUGIN 1, HUGIN 1000, HUGIN 3000. REMUS AUV dikembangkan oleh Prestero (2001), dan NPS ARIES AUV dikembangkan oleh Healey (2002) di pusat penelitian AUV, *Naval Postgraduate School*, USA. *Bluefin Robotics* AUV dikembangkan oleh Panish dan Taylor (2011) di Laboratorium AUV MIT. Gambar 1.1 - 1.4 mengilustrasikan beberapa perkembangan AUV.



a



b

Gambar 1.1. a. NDRE AUV, b. HUGIN 1 AUV

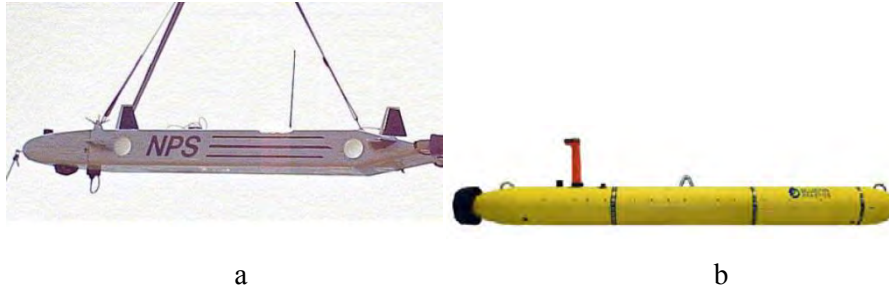


a

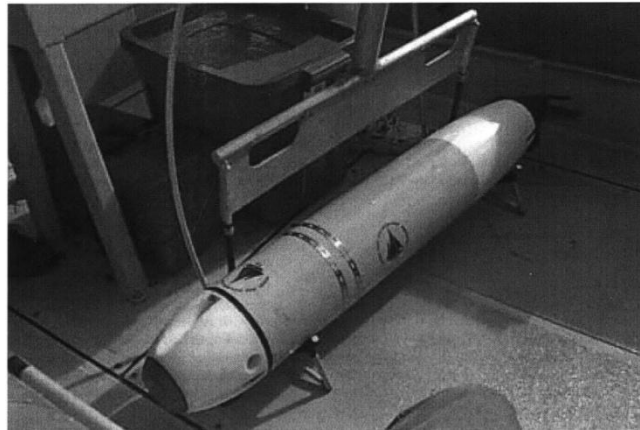


b

Gambar 1.2. a. HUGIN 3000 AUV, b. HUGIN 1000 AUV



Gambar 1.3. a. NPS ARIES AUV, b. *Bluefin Robotics* AUV



Gambar 1.4. REMUS AUV

Memperhatikan kegunaan dan manfaat dari AUV di atas, maka Indonesia sangat perlu mengembangkan AUV, karena lebih dari 70% dari wilayah Indonesia adalah lautan, sehingga AUV merupakan teknologi yang baik untuk menjaga potensi laut Indonesia. AUV sangat diperlukan untuk membantu survei eksplorasi bawah laut Indonesia (Herlambang dkk, 2014b), karena AUV relatif flexibel untuk eksplorasi lautan tanpa menggunakan kabel sehingga dapat berenang dengan bebas tanpa hambatan (Kondo dan Ura, 2014). Seringkali kita jumpai berbagai masalah dan kendala dalam hal survei bawah laut, baik dalam peralatan yang digunakan ataupun sumber daya manusia sebagai subjeknya. Padahal monitoring bawah laut perlu dilakukan secara berkala dan teratur untuk mendapatkan data-data dan informasi yang lengkap dan akurat. Dengan sumber daya manusia dan teknologi yang tersedia sekarang ini hal tersebut masih terasa sulit untuk dicapai dan berakibat pada minimnya informasi dan data yang dihasilkan baik secara kualitas ataupun kuantitas.

Oleh karena itu dirasa perlu mengembangkan kemampuan rancang bangun AUV. Sehubungan dengan itu haruslah didorong untuk diadakan penelitian dalam

rangka meningkatkan program inovasi teknologi, khususnya pada sistem navigasi, panduan dan kendali pada AUV. Navigasi adalah sebuah proses penentuan posisi atau lokasi di mana AUV berada. Berdasar pada posisi AUV, sistem panduan menghasilkan lintasan yang harus dilewati oleh AUV yang didapatkan dari sistem AUV. Selanjutnya sistem kendali mengatur gerak AUV agar tetap stabil.

Beberapa penelitian sistem navigasi dan panduan AUV yang sudah pernah dilakukan antara tahun 1990an sampai dewasa ini dapat dijabarkan sebagai berikut: An dkk (1997) menjelaskan sistem navigasi AUV dengan metode heuristic fuzzy filtering, kemudian Fulton dan Cassidy (2001) menjelaskan tentang sistem navigasi akustik dan kompas dengan metode Extended Kalman Filter (EKF). Healey (2002) menjelaskan sistem navigasi dengan EKF pada 3 (tiga) subsistem yaitu *depth*, *altitude* dan *heading* sedangkan Garcia dkk menggunakan metode Augmented State Kalman Filter (ASKF), setelah itu Loebis dkk (2004) menjelaskan sistem navigasi dengan metode EKF, Simple Kalman Filter (SKF), Fuzzy Simple Kalman Filter (FSKF), Fuzzy Extended Kalman Filter (FEKF). Selanjutnya Kalyan dkk menggunakan metode EKF dengan multi sensor untuk estimasi posisi AUV. Lamnas dkk (2007) menjelaskan sistem navigasi dengan EKF dan Particle Filter pada model non-linear 6-DOF. Bartolini dkk (2009) menjelaskan sistem navigasi dengan EKF pada AUV REMUS, diikuti He dkk (2011) menggunakan metode extended information filter pada model non-linear 5-DOF. Luque (2011) menggunakan metode Kalman Filter dan *maximum likelihood* selanjutnya Panish dan Taylor (2011) menggunakan metode *sigma-point* Unscented Kalman Filter (UKF). Barisic dkk (2012) juga menjelaskan sistem navigasi dengan metode *sigma-point* Unscented Kalman Filter (UKF) pada model non-linier 6-DOF. Nurhadi dkk (2012) menggunakan Ensemble Kalman Filter (EnKF) untuk model non-linier 3-DOF, di mana hanya gerak translasi saja dengan mengabaikan gerak rotasi. Paull dkk (2014) menggunakan metode EKF pada model non-linear 6-DOF.

Beberapa penelitian sistem kendali AUV yang sudah pernah dilakukan antara tahun 1990an sampai saat ini dapat dijabarkan sebagai berikut. Jalving dan Storkersen (1994) meneliti tentang kendali gerak AUV dengan menggunakan Proportional Integator Derivative (PID) pada 3 (tiga) subsystem *speed*, *steering*

dan *diving*, kemudian Chiu dkk (2000) menjelaskan sistem kendali gerak AUV dengan Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC) menggunakan sistem 2-DOF. Selanjutnya Kanakakis dkk (2001) menjelaskan sistem kendali dengan Fuzzy Logic Controller (FLC) pada model non-linier 6-DOF. Setelah itu Kim dan Ura (2002) menggunakan PID pada AUV *R-One Robot*. Diikuti Naeem (2002) menggunakan metode Model Predictive Control (MPC) untuk AUV. Guo dkk (2003) menggunakan Sliding Mode Fuzzy Controller (SMFC), dan selanjutnya Kondo dan Ura (2004) menggunakan PID. Kemudian Li dan Lee (2005) menggunakan metode *adaptive non-linear controller* berdasar teori Lyapunov dan teknik *backstepping*. Repoulas dan Papadopoulos (2005) menggunakan metode *partial state feedback linearization* pada model 3 DOF, selanjutnya Shi (2006) menggunakan metode *sliding mode autopilot* dengan eliminasi *error steady state*. Lapierre dan Soesanto (2007) menggunakan metode path following control berdasar teori Lyapunov dan teknik *backstepping*, kemudian Naik dan Singh (2007) menggunakan *robust sub-optimal control* dengan *state dependent riccati*. Wu dkk (2008) menggunakan metode *Genetic Algorithm* (GA) untuk beberapa AUV. Setelah itu Jantapemjit dkk (2008) menggunakan metode Sliding Mode Control (SMC), serta Wang dkk (2008) menggunakan metode tracking control berdasar Lyapunov dan backstepping pada model non-linear 3-DOF. Kemudian McGann dkk (2008) mengembangkan model menggunakan metode *adaptive control*, selanjutnya Lapierre dkk (2008) menggunakan metode *non-linear adaptive control*. Diikuti oleh Bartolini dkk (2009) yang menggunakan metode *second-order* Sliding Mode Control (2-SMC) dan Lapierre (2009) menggunakan *robust diving control* berdasar teknik Lyapunov dan *backstepping*, serta selanjutnya Sun dan Cheah (2009) menggunakan metode Adaptive Proportional Derivative (APD). Petrich dan Stilwell (2010) menggunakan metode PID dan Craven dkk (2010) menggunakan metode adaptive network fuzzy Sugeno pada model linear 5-DOF tanpa mode gerak roll, di mana model linear tanpa linearisasi. Sedangkan Andonian dkk (2010) menggunakan metode *Geometric Control* pada model non-linear 6-DOF. Rhif (2011) dalam penelitiannya menggunakan metode SMC pada model non-linear 4-DOF. Forouzantabar dkk (2012) menggunakan metode Adaptive Neural Network Control pada model non-linear 6-DOF,

selanjutnya Kim dan Ura (2012) menggunakan metode PID, dan kemudian Tang dkk (2012) menggunakan fuzzy-PID control berdasar Generalized Predictive Control (GPC). Rezazadegan dkk (2013) menggunakan metode *adaptive non-linear control* pada model 5-DOF.

Mengacu pada penelitian dan pengembangan terdahulu yang sudah disampaikan dalam paragraf di atas kemudian dipertimbangkan penting untuk mengembangkan sistem navigasi, panduan dan kendali gerak pada AUV. Aspek ini diawali dengan penyusunan model matematika dari AUV, di mana model ideal yang biasa digunakan adalah model non-linier. Pada penelitian sebelumnya telah digunakan model dengan 2-DOF (Chiu dkk, 2000), model 3-DOF (Repoulias dan Papadopoulos, 2007; Wang dkk, 2008; Palmer dkk, 2009; Akcaya dkk, 2009), model 4-DOF (Rhif, 2011), model 5-DOF (Rezazadegan dkk, 2013), serta model 6-DOF (Kim dan Ura, 2002; Repoulias dkk, 2007; Jantapremjit dan Wilson, 2008; Lappierre dkk, 2009). Pengembangan model 6-DOF sebenarnya masih jarang dilakukan, dikarenakan kompleksitasnya mengingat pemodelan harus memecahkan persamaan *strong non-linear*. Mempertimbangkan hal tersebut maka pada penelitian yang disampaikan dalam disertasi ini telah diajukan pengembangan model linear yang dihasilkan melalui linearisasi model non-linier 6-DOF dengan matriks Jacobi.

Model linear yang dikembangkan tersebut kemudian dijadikan sebagai platform untuk diterapkan dalam sistem navigasi, panduan dan kendali gerak AUV. Guna menjaga keakurasian posisi secara terus menerus dari AUV yang melaju maka perlu diterapkan estimasi trajektori pada navigasi dan panduan dengan metode estimasi seperti Ensemble Kalman filter (EnKF) dan Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR). Metode ini dikembangkan untuk mengurangi waktu komputasi dan meningkatkan akurasi hasil estimasi, sehingga kebutuhan navigasi dan panduan yang cepat dan akurat dapat diperoleh. Selanjutnya untuk menjaga kestabilan AUV, akan diterapkan sistem kendali gerak seperti Proportional Integral Derivative (PID) dan Sliding Mode Control (SMC).

Hasil komparasi metode EnKF dan EnKF-SR pada model linear kemudian dibandingkan dengan metode Kalman Filter (KF). Pada penelitian ini terdapat sepuluh kasus dalam penentuan lintasan yang harus dilalui AUV. Lintasan

pertama adalah gerakan maju lurus tanpa belok dan diving, lintasan kedua gerakan belok tanpa diving, lintasan ketiga gerakan diving tanpa belok, lintasan keempat gerakan belok dengan diving, lintasan kelima gerakan memutar tanpa diving, lintasan keenam gerakan memutar dengan diving, lintasan ketujuh gerakan memutar ellips tanpa diving, lintasan kedelapan yaitu gerakan memutar ellips dengan diving, lintasan kesembilan gerakan diving dan *emerging* tanpa belok serta lintasan kesepuluh yang merupakan gerakan *diving* dan *emerging* dengan belok.

1.2 RUMUSAN MASALAH

Dengan mengacu uraian dalam sub-bab 1.1 maka pada penelitian ini diajukan ada tiga rumusan masalah, sebagai berikut:

1. Bagaimana model gerakan non-linier AUV dalam 6-DOF dilinierisasi dengan matriks Jacobi, sehingga didapatkan model linier?
2. Bagaimana sistem navigasi dan panduan dikembangkan dengan metode Ensemble Kalman Filter (EnKF), Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR) dan Kalman Filter (KF) pada model linier dari AUV ?
3. Bagaimana sistem kendali gerak dikembangkan dengan metode Proportional Integral Derivative (PID), Sliding Mode Control (SMC) dan Sliding PID (SPID) pada model linier dari AUV ?

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Dengan memperhatikan rumusan masalah pada sub-bab 1.2 maka tujuan dari penelitian ini akan mencakup aspek-aspek sebagai berikut:

1. Melinierkan model gerakan non-linier AUV dalam 6-DOF dengan matriks Jacobi, sehingga akan didapatkan model linier.
2. Mengembangkan sistem navigasi dan panduan dengan metode Ensemble Kalman Filter (EnKF), Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR) dan Kalman Filter (KF) pada model linear dari AUV.
3. Mengembangkan sistem kendali gerak dengan metode Proportional Integral Derivative (PID), Sliding Mode Control (SMC) dan Sliding PID (SPID) pada model linier dari AUV.

1.4 BATASAN MASALAH

Sejumlah batasan masalah telah dipertimbangkan untuk diterapkan pada penelitian ini, meliputi:

1. AUV yang dikaji dalam penelitian ini adalah AUV tipe *Segorogeni* yang tersedia di Laboratorium Mekatronika, Program D3 Teknik Mesin ITS
2. AUV yang digunakan tidak memakai sistem ballast
3. Diasumsikan tidak ada *disturbance* atau gangguan selama AUV bergerak, sebagai misal efek kapal permukaan atau benda apung lain, efek gerak kapal selam atau wahana bawah air lain, serta efek gelombang permukaan.
4. Diasumsikan tidak ada arus bawah air pada lintasan gerak AUV.
5. Kajian yang dilakukan adalah kajian numerik dan simulasi.
6. Simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* Matlab.

1.5 ORIGINALITAS

Ada tiga aspek originalitas yang diharapkan dapat berkontribusi dari penelitian ini, yaitu:

1. Penyelesaian model linier dari linierisasi model non-linier dengan matriks Jacobi.
2. Penerapan model linier yang diperoleh dari linierisasi untuk memodelkan gerakan AUV dalam 6-DOF.
3. Penggabungan sistem navigasi, panduan dan kendali gerak AUV pada model gerakan AUV dalam 6-DOF.

1.6 MANFAAT PENELITIAN DAN KONTRIBUSI

Dengan memperhatikan tujuan penelitian diharapkan dapat berkontribusi pada *basic research* dari sistem navigasi, panduan dan kendali gerak AUV. Selain itu diharapkan memberikan kontribusi dalam desain parameter AUV sebelum dilakukan rancang bangun AUV.

1.7 SISTEMATIKA PENULISAN

Penulisan disertasi ini disusun dalam 5 bab, yaitu :

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini memuat uraian tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, originalitas, manfaat penelitian dan kontribusi serta sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan tentang *critical review* terhadap makalah-makalah ilmiah, baik dari jurnal, prosiding seminar ataupun buku teks dan literatur lain yang terkait dengan pemodelan AUV, sistem navigasi panduan dan kendali gerak AUV. Selanjutnya pembahasan menyangkut dasar teori dari pemodelan gerak AUV, sistem navigasi dan panduan. Dalam hal pemodelan gerak AUV akan dibahas dasar teori yang terkait dengan metode linierisasi model non-linier. Hal ini dilanjutkan dengan peninjauan dasar teori navigasi dan panduan yang meliputi penerapan metode Ensemble Kalman Filter (EnKF) dan Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR). Sedangkan untuk sistem kendali gerak, dasar teori yang ditinjau adalah penerapan dari metode Proportional Integral Derivatif (PID), Sliding Mode Control (SMC) dan Sliding PID (SPID), dilanjutkan dengan dasar teori tentang keterkontrolan dan keteramatan serta analisa kestabilan Lyapunov.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai metodologi penelitian yang diterapkan. Diawali dengan studi pustaka, penentuan model non-linier 6-DOF AUV dan linierisasi model non-linier sehingga didapatkan model linier, dengan memperhitungkan hasil komputasi koefisien hidrodinamika. Tahap berikutnya adalah menguji karakteristik model linier terkait keterkontrolan dan keteramatan. Selanjutnya dilakukan simulasi sistem navigasi dan panduan dengan tiga metode, yaitu EnKF, EnKF-SR dan KF. Setelah itu dilakukan simulasi sistem kendali gerak dengan tiga metode, yaitu PID, SMC dan SPID serta analisa kestabilan Lyapunov. Pada akhirnya tujuan penelitian akan terjawab oleh hasil dari simulasi sistem navigasi, panduan dan kendali gerak.

BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan tentang proses linierisasi model non-linier dengan menerapkan matriks Jacobi. Berdasarkan model linier selanjutnya disusun model numerik gerak dalam 6-DOF yang mengakomodasi variabel-variabel hidrodinamika AUV. Model numerik yang disusun kemudian digunakan untuk melakukan simulasi sistem navigasi dan panduan dengan mengkombinasikan metode EnKF, EnKF-SR dan KF. Simulasi dilakukan untuk melihat karakteristik navigasi dan panduan untuk sepuluh variasi lintasan AUV, yang mencakup juga pengkajian akurasi posisi dan kecepatan pada masing-masing lintasan. Proses ini pada tahap berikutnya diikuti dengan merancang persamaan sistem kendali dan simulasi sistem kendali gerak berdasarkan penerapan metode PID, SMC dan SPID. Studi komparasi akan dilakukan untuk melihat kesalahan pola gerak yang dihasilkan dari ketiga metode tersebut. Pada tahap terakhir, akan ditinjau sifat kestabilan sistem dari ketiga metode tersebut melalui pengujian dengan metode Lyapunov.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini disampaikan kesimpulan dari hasil kajian tentang model linier gerak AUV dalam 6-DOF serta sistem navigasi, panduan dan kendali gerak, yang disarikan dari hasil pembahasan dalam bab 4. Selanjutnya saran-saran diajukan demi kelanjutan dan penyempurnaan penelitian yang disampaikan pada disertasi ini.

LAMPIRAN

Pada lampiran ini disertakan lampiran A, B, C dan D yang merupakan hasil simulasi dan *interface* dari sistem navigasi dan panduan serta video representasi sepuluh bentuk lintasan. Lampiran E dan F menunjukkan dokumen publikasi dan daftar riwayat hidup penulis.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pengembangan sistem navigasi, panduan dan kendali gerak AUV untuk model linier di mana didapatkan melalui proses linierisasi model non-linier 6-DOF dengan matriks Jacobi. Selanjutnya pada sistem navigasi dan panduan diterapkan metode Ensemble Kalman Filter (EnKF) dan Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR) untuk estimasi lintasan, dan pada kendali gerak diterapkan metode PID, Sliding Mode Control (SMC) dan Sliding-PID (SPID).

2.1 PEMBAHASAN PENELITIAN TERDAHULU

Beberapa penelitian telah dilakukan terkait AUV baik menyangkut pemodelan matematika gerakan, sistem navigasi, panduan dan kendali gerak. Pada beberapa penelitian tersebut ada beberapa yang belum dilakukan, dan akan dilakukan pada penelitian ini.

2.1.1 Penelitian Terdahulu tentang Pemodelan Matematis Gerakan AUV

Jika ditinjau dari model matematis gerakan AUV, terdapat beberapa model matematis gerakan AUV dalam derajat kebebasan yang telah digunakan oleh peneliti terdahulu di antaranya model matematis dalam 2 (dua) sampai 6 (enam) derajat kebebasan (DOF). Model 2-DOF di antaranya: Chiu dkk (2000) menggunakan gerak surge dan roll, Naik dan Singh (2007) menerapkan gerak heave dan pitch. Luque dkk (2011) menggunakan gerak sway dan yaw. Model 3-DOF di antaranya: Repoulas dan Papadopoulos (2005) mengembangkan model dengan gerak heave, pitch dan roll, serta Palmer dkk (2009) menerapkan model gerak surge, heave dan pitch.

Beberapa peneliti juga telah mengembangkan model non-linier 5-DOF dan 6-DOF, di mana model 5-DOF di antaranya: Chiu dkk (2000) menggunakan model 5-DOF tanpa gerak roll. Craven dkk (2010) menggunakan model 5-DOF tanpa gerak surge. Beberapa peneliti telah mengembangkan model nonlinier 6-DOF di antaranya: An dkk (1997), Fulton dan Cassidy (2001), Kanakakis dkk (2001),

Kim dan Ura (2002), Healey (2002), Loebis dkk (2004), Garcia dkk (2002), Lamnas dkk (2007), Kim dan Choi (2007), Repoulas dan Papadopoulos (2007), Jantapremjit dkk (2008), Bartolini dkk (2009), Lapierre (2009), Petrich dan Stilwell (2010), Andonian dkk (2010), Barisic dkk (2012), Kalyan dan Balasuriya (2004), Paull dkk (2014), dan Armstrong dkk (2012). Selain model non-linier yang dikembangkan, model linier 3-DOF juga telah dikembangkan oleh , Akcaya dkk (2009) menggunakan surge, sway dan yaw, di mana model linier didapatkan dari hasil linierisasi dengan software *linmod* pada Matlab

Bila ditinjau dari model fisik AUV yang telah digunakan dalam penelitian, maka berbagai variasi yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti, di antaranya: Kanakakis dkk (2001) menggunakan NPS *Phoenix* AUV dengan panjang 7.302 ft dan massa 13.52 lbs. Kim dan Ura (2002) mengkaji *R-One Robot* AUV dengan panjang 8.3 meter, diameter 1.2 meter dan massa 4400 kg. Naik dan Singh (2007) menggunakan *Biorobotics* AUV dengan panjang 2 meter, massa 30.48 Kg dan kecepatan operasi 2 knot. Kim dan Choi (2007) menggunakan SNUUV 1 AUV dengan panjang 1.35 m dan diameter 0.25 m. Lapierre (2009) mengkaji *Taipan 2* AUV dengan panjang 1.8 m, diameter 0.2 m dan massa 60 Kg. Petrich dan Stilwell (2010) menggunakan *Virginia Tech 475* AUV dengan panjang 1 meter, diameter 0.12 meter dan berat 8.5 kg. Akcaya dkk (2009) menggunakan NPS II AUV dengan panjang 3 m, diameter 0.25 m dan massa 225 Kg serta kecepatan 3.5 knot. Palmer dkk (2009) mengkaji AUV dengan panjang 7 meter, diameter 0.9 meter dan massa 3600 kg. Andonian dkk (2010) mengkaji DEPTHX AUV dengan bentuk bola di mana volume 1.5 m^3 dengan massa 1500 kg. Luque (2011) menggunakan *Pirajuba* AUV dengan panjang 1.742 meter, diameter 0.234 meter dan massa 54 kg, Craven dkk (2011) mengkaji *Autosub* AUV dengan panjang 7 m, diameter 1 m dan massa 3600 kg, diikuti oleh Barisic dkk (2012) menerapkan *Infante* AUV dengan panjang 4.215 m dan massa 23 Kg,

Pada Tabel 2.1 menjelaskan pemetaan penelitian terdahulu terkait pemodelan matematika gerakan AUV dengan yang dilakukan pada penelitian ini.

Tabel 2.1. Critical review jurnal terkait pemodelan matematika gerakan AUV

Judul	Penulis	Aspek kajian yang telah dilakukan	Penelitian sekarang
Analysis on the controlled nonlinear motion of a test bed AUV-SNUUV 1	Kim dan Choi (2007)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: Non-linier 6 DOF 2. Model Fisik AUV: SNUUV 1 AUV dengan panjang 1.35 m dan diameter 0.25 m 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Navigation and control of AUVs via second order Sliding-Mode and Extended Kalman Filtering	Bartolini dkk, (2009)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6 DOF 2. Model Fisik AUV: - 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Robust diving control of an AUV	Lapierre, L. (2009)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6 DOF 2. Model Fisik AUV: <i>Taipan 2</i> AUV dengan panjang 1.8 m, diameter 0.2 m dan massa 60 Kg. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Three Dimensional Trajectory Control of Underactuated AUVs	Repoulas dan Papadopoulos (2007)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6 DOF 2. Model Fisik AUV: - 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
3-Dimensional Trajectory	Kim dan Ura (2002)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV:

Tracking Control of an AUV “R-One Robot” Considering Current Interaction		<p>AUV: non-linier 6 DOF</p> <ol style="list-style-type: none"> Model Fisik AUV: <i>R-One Robot</i> AUV dengan panjang 8.3 meter, diameter 1.2 meter dan massa 4400 kg 	<p>Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi</p> <ol style="list-style-type: none"> Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Design of an adaptive non-linier controller for depth control of an autonomous underwater vehicle.	Li dan Lee (2005)	<ol style="list-style-type: none"> Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6 DOF Model Fisik AUV: - 	<ol style="list-style-type: none"> Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Model simplification for AUV pitch-axis control design.	Petrich dan Stilwell (2010)	<ol style="list-style-type: none"> Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6 DOF Model Fisik AUV: <i>Virginia Tech 475</i> AUV dengan panjang 1 meter, diameter 0,12 meter dan berat 8,5 kg 	<ol style="list-style-type: none"> Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Trajectory Planning and Tracking Control of Under-actuated AUVs*	Repoulas dan Papadopoulos (2005)	<ol style="list-style-type: none"> Model Matematis gerakan AUV: non-linier 3-DOF (Heave, pitch dan roll) Model Fisik AUV: - 	<ol style="list-style-type: none"> Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Sliding mode control of AUV	Akcaya dkk (2009)	<ol style="list-style-type: none"> Model Matematis gerakan AUV: linier 3-DOF (surge, sway dan yaw) yang merupakan hasil linierisasi dengan software <i>linmod</i> di 	<ol style="list-style-type: none"> Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg

		Matlab 2. Model Fisik AUV: NPS II AUV dengan panjang 3 m, diameter 0.25 m dan massa 225 Kg serta kecepatan 3.5 knot	diameter 0.18 m dan massa 15 Kg serta kecepatan 2 knot.
Application of the sliding mode fuzzy controller to the guidance and control of an autonomous underwater vehicle	Chiu dkk (2000)	1. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 2-DOF (surge dan roll) 2. Model Fisik AUV: <i>Haimin</i> AUV (tidak ada spek khusus)	1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Design of an adaptive nonlinear controller for an autonomous underactuated underwater vehicle	Rezazadegan dkk (2013)	1. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 5-DOF tanpa roll 2. Model Fisik AUV: -	1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Geometric control for autonomous underwater vehicle overcoming a thruster failure	Andonian dkk (2010)	1. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF 2. Model Fisik AUV: DEPTHX AUV dengan bentuk bola di mana volume 1.5 m ³ dengan massa 1500 kg	1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Adaptive neural network of autonomous underwater vehicle	Forouzanbar (2012) dkk	1. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF 2. Model Fisik AUV: -	1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg

State dependent riccati equation based robust dive plane control of AUV with control constraints	Naik dan Singh (2007)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 2-DOF (heave dan pitch) 2. Model Fisik AUV: <i>Biorobotics</i> AUV dengan panjang 2 meter, massa 30.48 Kg dan kecepatan operasi 2 knot 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg dan kecepatan operasi 2 knot
AUV identification and robust control	Luque dkk (2011)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 2-DOF (sway dan yaw) 1. Model Fisik AUV: <i>Pirajuba</i> AUV dengan panjang 1.742 meter, diameter 0.234 meter dan massa 54 kg 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Design and testing of fuzzy logic controller for an AUV	Kanakakis dkk (2001)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF 2. Model Fisik AUV: NPS PHOENIX AUV dengan panjang 7.302 ft dan massa 13.52 lbs 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Multivariable intelligent control strategies for an autonomous underwater vehicle	Craven dkk (2010)	<ol style="list-style-type: none"> 3. Model Matematis gerakan AUV: linier 5-DOF tanpa surge 4. Model Fisik AUV: <i>Autosub</i> AUV dengan panjang 7 m, diameter 1 m dan massa 3600 kg 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
A 6-DoF Navigation Algorithm for Autonomous Underwater Vehicles	Lammas dkk (2007)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF 2. Model Fisik AUV: - 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi

Sigma-Point Unscented Kalman Filter Used For AUV Navigation	Barisic dkk (2012)	<p>1. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF</p> <p>2. Model Fisik AUV: <i>Infante</i> AUV dengan panjang 4.215 m dan massa 23 Kg</p>	<p>2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg</p> <p>1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi</p> <p>2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg</p>
AUV Navigation and Localization: A Review	Paull dkk (2014)	<p>1. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF</p> <p>2. Model Fisik AUV: -</p>	<p>1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi</p> <p>2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg</p>
Control and Guidance Approach Using AUV	Jantapremjit dkk (2008)	<p>1. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF</p> <p>2. Model Fisik AUV: -</p>	<p>1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi</p> <p>2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg</p>
A Theoretical Approach to Facilitating Transition Phase Motion in A Positively Bouyant Autonomous Underwater Vehicle	Palmer dkk (2009)	<p>1. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 3-DOF (surge, heave dan pitch)</p> <p>2. Model Fisik AUV: AUV dengan panjang 7 meter, diameter 0,9 meter dan massa 3600 kg</p>	<p>1. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi</p> <p>2. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg</p>

2.1.2 Penelitian Terdahulu tentang Sistem Navigasi dan Panduan pada AUV

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian di bidang sistem navigasi pada AUV, di mana beberapa metode yang telah digunakan adalah metode Extended Kalman Filter (EKF), yaitu: An dkk (1997), Fulton dan Cassidy (2001), Healey (2002), Loebis dkk (2004), Kalyan and Balasuriya (2004), Lamnas dkk (2007), Bartolini dkk (2009), Armstrong dkk (2010), Paull dkk (2014). Metode Sigma-Point Unscented Kalman Filter (UKF), yaitu Panish dan Taylor (2011) dan Barisic dkk (2012), sedangkan metode Ensemble Kalman Filter (EnKF) yaitu Nurhadi dkk (2012). Metode Kalman Filter (KF), yaitu: Garcia dkk (2002) dan Luque (2011). Metode extended information filter (EIF) digunakan oleh He dkk (2011).

An dkk (1997) selain menggunakan EKF, juga menggunakan heuristic fuzzy filtering. Loebis dkk (2004) selain mengembangkan EKF, juga menerapkan simple Kalman filter (SKF), Fuzzy Simple Kalman Filter (FSKF), Fuzzy Extended Kalman Filter (FEKF) sebagai sistem navigasi. Kalyan (2004) mengembangkan metode EKF dengan *Forward Looking Sonar* (FLS) dan *Charged Coupled Device* (CCD). Paul dkk (2004) juga mengembangkan metode *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM). Lammas dkk (2007) juga mengembangkan Particle Filter yang dibandingkan dengan EKF.

Jika ditinjau dari model matematis gerakan AUV, terdapat beberapa model matematis gerakan AUV dalam derajat kebebasan yang telah digunakan oleh peneliti terdahulu di antaranya model matematis dalam 2 (dua) sampai 6 (enam) derajat kebebasan (DOF). Luque (2011) mengembangkan model 2-DOF untuk gerak sway dan yaw, sedangkan Nurhadi dkk (2012) menggunakan model 3-DOF untuk gerak surge, sway dan heave. He dkk (2011) menerapkan model matematis 5-DOF tanpa gerak roll. Beberapa peneliti telah mengembangkan model nonlinier 6-DOF di antaranya: Bartolini dkk (2009), Healey (2002), Loebis dkk (2004), An dkk (1997), Garcia dkk (2002), Lamnas dkk (2007), Barisic dkk (2012), Kalyan dan Balasuriya (2004), Paull dkk (2014), Fulto dan Cassidy (2001), dan Armstrong dkk (2012).

Bila ditinjau dari model fisik AUV yang telah digunakan dalam penelitian, maka berbagai variasi yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti, di antaranya: An dkk (1997) menggunakan *Ocen Explorer* AUV dengan panjang 7 ft dan diameter 21 cm, speed 3 knot. Selanjutnya Fulton dkk (2001) menggunakan REMUS AUV. Healey, A.J (2002) mengkaji NPS ARIES AUV dengan panjang 3 m, diameter 0.25 m dan massa 225 kg, diikuti oleh Garcia dkk (2002) menggunakan GARBI AUV, dan Loebis dkk (2004) mengkaji *Hammerhead* AUV. Luque (2011) menggunakan *Pirajuba* AUV dengan panjang 1.742 meter, diameter 0.234 meter dan massa 54 kg, selanjutnya He dkk (2011) mengkaji *C-Ranger* AUV, sedangkan Panish dan Taylor (2012) menggunakan *Bluefin robotic* AUV. Barisic dkk (2012) menerapkan *Infante* AUV dengan panjang 4.215 m dan massa 23 Kg, selanjutnya Nurhadi dkk (2012) mengkaji ITS AUV 01 dengan panjang 1.5 m, diameter 0.2 m dan massa 19.8 Kg.

Pada Tabel 2.2 menjelaskan pemetaan penelitian terdahulu terkait sistem navigasi dan panduan pada AUV dengan yang dilakukan pada penelitian ini.

Tabel 2.2. Critical review jurnal terkait sistem navigasi dan panduan pada AUV

Judul	Penulis	Aspek kajian yang telah dilakukan	Penelitian sekarang
Navigation and control of AUVs via second order Sliding-Mode and Extended Kalman Filtering	Bartolini, G dkk, (2009)	1. Metode: EKF 2. Model matematis gerakan AUV: non-linier 6 DOF Model Fisik AUV: -	3. Metode: EnKF, EnKF-SR dan KF 4. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 5. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Guidance and Control, For Small AUVs Using DGPS and Doppler Aided Inertial Underwater Navigation.	Healey, A.J (2002)	1. Metode: EKF 2. Model matematis gerakan AUV: non-linier 6 DOF Model Fisik AUV: NPS ARIES AUV dengan panjang 3 m, diameter 0.25 m dan massa 225 kg	1. Metode: EnKF, EnKF-SR dan KF 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Adaptive tuning of a Kalman filter via fuzzy logic for an intelligent AUV navigation system	Loebis, D. dkk (2004)	1. Metode: extended Kalman filter (EKF), simple Kalman filter (SKF), Fuzzy Simple Kalman Filter (FSKF), Fuzzy Extended Kalman Filter (FEKF) 2. Model matematis gerakan AUV: non-linier 6 DOF 3. Model Fisik AUV: <i>Hammerhead</i> AUV	1. Metode: EnKF, EnKF-SR dan KF 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Asynchronous data fusion for AUV navigation via heuristic fuzzy filtering	An, P.E dkk (1997)	1. Metode: EKF dan heuristic fuzzy filtering 2. Model matematis gerakan AUV:	1. Metode: EnKF, EnKF-SR dan KF 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi

tecniques		non-linier 6 DOF Model Fisik AUV: <i>Ocen Explorer</i> AUV dengan panjang 7 ft dan diameter 21 cm, speed 3 knot	dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Autonomous navigation for autonomous underwater vehicles based on information filters and active sensing	He,B. dkk (2011)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: extended information filter (EIF)berbasis simultaneous localization and mapping (SLAM) 2. Model matematis gerakan AUV: non-linier 5-DOF tanpa roll 3. Model Fisik AUV: <i>C-Ranger</i> AUV 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: EnKF, EnKF-SR dan KF 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
AUV identification and robust control	Luque,J.C.C (2011)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: kalman filter dan <i>maximum likelihood</i> 2. Model matematis gerakan AUV: non-linier 2-DOF (sway dan yaw) 3. Model Fisik AUV: <i>Pirajuba</i> AUV dengan panjang 1.742 meter, diameter 0.234 meter dan massa 54 kg. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: EnKF, EnKF-SR dan KF 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Achieving High Navigation Accuracy Using Inertial Navigation Systems	Panish dan Taylor (2011)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: Sigma-Point Unscented Kalman Filter (UKF) 2. Model Matematis gerakan AUV: - 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: EnKF, EnKF-SR dan KF 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi

in Autonomous Underwater Vehicles		3. Model Fisik AUV: <i>Bluefin robotic</i> AUV	3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Augmented State Kalman Filtering for AUV Navigation	Garcia, R dkk (2002)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: Augmented State Kalman Filter 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6 DOF 3. Model Fisik AUV: GARBI AUV 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: EnKF, EnKF-SR dan KF 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
A 6 DoF Navigation Algorithm for Autonomous Underwater Vehicles	Lammas dkk (2007)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: EKF dan Particle Filter 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6 DOF 3. Model Fisik AUV: - 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: EnKF, EnKF-SR dan KF 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Sigma-Point Unscented Kalman Filter Used For AUV Navigation	Barisic, M. dkk (2012)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: Sigma-Point Unscented Kalman Filter (UKF) 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6 DOF 3. Model Fisik AUV: <i>Infante</i> AUV dengan panjang 4.215 m dan massa 23 Kg 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: EnKF, EnKF-SR dan KF 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Multiple Sensors based Navigation Scheme for AUV Position Estimation	Kalyan and Balasuriya (2004)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: EKF menggunakan Forward Looking Sonar (FLS) dan Charged Coupled Device (CCD) 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6 DOF 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: EnKF, EnKF-SR dan KF 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m

AUV Navigation and Localization: A Review	Paull dkk (2014)	3. Model Fisik AUV: NTU AUV 1. Metode: EKF dan <i>Simultaneous Localization and Mapping</i> (SLAM) 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6 DOF 3. Model Fisik AUV: -	dan massa 15 Kg 1. Metode: EnKF, EnKF-SR dan KF 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Navigation Sensor Data Fusion for the AUV Remus	Fulton dan Cassidy (2001)	1. Metode: EKF 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6 DOF 3. Model Fisik AUV: REMUS AUV	1. Metode: EnKF, EnKF-SR dan KF 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
AUV Navigation in the Presence of a Magnetic Disturbance with an Extended Kalman Filter	Armstrong dkk (2010)	1. Metode: EKF 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6 DOF 3. Model Fisik AUV: -	1. Metode: EnKF, EnKF-SR dan KF 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Design of Position Estimation Algorithm of Navigation and Trajectory System for Unmanned Underwater Vehicle ITS AUV-01 using Ensemble Kalman Filter (EnKF)	Nurhadi dkk (2012)	1. Metode: EnKF 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 3-DOF 3. Model Fisik AUV: ITS AUV 01 dengan panjang 1.5 m, diameter 0.2 m dan massa 19.8 Kg	1. Metode: EnKF, EnKF-SR dan KF 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6 DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg

2.1.3 Penelitian Terdahulu tentang Sistem Kendali Gerak AUV

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian di bidang sistem navigasi pada AUV, di mana beberapa metode yang telah digunakan adalah metode PID, yaitu: Jalving dan Storkersen (1995), Kim dan Ura (2002), Kondo dan Ura (2004), Repoulas dan Papadopoulos (2007), Petrich dan Stilwell (2010), Kim dan Ura (2012). Sliding Mode Control (SMC), yaitu: Akcaya dkk (2009) dan Shi (2006), sedangkan Bartolini dkk (2009) mengembangkan second-order sliding mode control (2-SMC). Fuzzy Logic Control (FLC), yaitu: Kanakakis dkk (2001), Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC), yaitu: Chiu dkk (2000), Guo dkk (2003), Jantapremjit dkk (2008), Andonian dkk (2010). Nonlinear Adaptive Control, yaitu: Li dan Lee (2005), Lapierre (2008), McGann, C. dkk (2008), Rezazadegan dkk (2013). Adaptive Neural Network, yaitu: Craven dkk (2010), Forouzentabar dkk (2012)

Selain metode kendali gerak di atas, ada beberapa metode di antaranya: Naeem (2002) mengembangkan sistem kendali gerak berdasarkan *model predictive control*. Repoulas dan Papadopoulos (2005) menggunakan *partial state-feedback*. Lapierre dan Soesanto (2007) menerapkan path-following control, selanjutnya Naik dan Singh (2007) menerapkan robust suboptimal control. Wu dkk (2008) menggunakan Genetic Algorithm, sedangkan Wang dkk (2008) menggunakan tracking control. Lapierre (2009) mengembangkan robust diving control, Sun dan Cheah (2009) menerapkan adaptive proportional-derivative dan Tang dkk (2012) menggunakan Fuzzy-PID controller.

Jika ditinjau dari model matematis gerakan AUV, terdapat beberapa model matematis gerakan AUV dalam derajat kebebasan yang telah digunakan oleh peneliti terdahulu di antaranya model matematis dalam 2 (dua) sampai 6 (enam) derajat kebebasan (DOF). Model 2-DOF di antaranya: Chiu dkk (2000) menggunakan gerak surge dan roll, Naik dan Singh (2007) menerapkan gerak heave dan pitch. Luque dkk (2011) menggunakan gerak sway dan yaw. Petric dan Stilwell (2010) mengembangkan gerak heave dan pitch. Naeem (2002) menggunakan surge dan yaw. Model 3-DOF di antaranya: Repoulas dan Papadopoulos (2005) mengembangkan model dengan gerak heave, pitch dan roll,

serta Palmer dkk (2009) menerapkan model gerak surge, heave dan pitch. Wang dkk (2008) menggunakan model gerak surge, sway dan yaw.

Beberapa peneliti juga telah mengembangkan model non-linier 5-DOF dan 6-DOF, di mana model 5-DOF di antaranya: Jalving dan Storkensen (1995) serta Chiu dkk (2000) menggunakan model 5-DOF tanpa gerak roll. Craven dkk (2010) menggunakan model 5-DOF tanpa gerak surge. Rezazadegan dkk (2013) juga mengkaji model 5-DOF tanpa gerak roll. Sedangkan untuk model nonlinier 6-DOF di antaranya: Kanakakis dkk (2001), Kim dan Ura (2002), Healey (2002), Garcia dkk (2002), Guo dkk (2003), Loebis dkk (2004), Kondo dan Ura (2004), Kalyan dan Balasuriya (2004), Li dan Lee (2005) Lamnas dkk (2007), Lapierre dan Soesanto (2007), Repoulas dan Papadopoulos (2007), Kim dan Choi (2007), Repoulas dan Papadopoulos (2007), Lapierre (2008), McGann dkk (2008), Jantapremjit dkk (2008), Wu dkk (2008), Bartolini dkk (2009), Lapierre (2009), Sun dan Cheah (2009), Petrich dan Stilwell (2010), Andonian dkk (2010), Kim dan Ura (2012), Paull dkk (2014), dan Armstrong dkk (2012), Forouzantabar dkk (2012), Tang dkk (2012). Selain model non-linier yang dikembangkan, model linier 3-DOF juga telah dikembangkan oleh Akcaya dkk (2009) menggunakan gerak surge, sway dan yaw, di mana model linier didapatkan dari hasil linierisasi dengan software *linmod* pada Matlab.

Bila ditinjau dari model fisik AUV yang telah digunakan dalam penelitian, maka berbagai variasi yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti, di antaranya: Jalving dan Storkensen (1995) menggunakan NDRE AUV, sedangkan Chiu dkk (2000) *Haimin* AUV. Naeem (2002) menggunakan AUV dengan panjang 7 meter dan diameter 1 meter, diikuti oleh Guo dkk (2002) menggunakan HMI AUV. Kim dan Ura (2002) *R-One Robot* AUV dengan panjang 8,3 meter, diameter 1,2 meter dan massa 4400 kg. Kondo dan Ura (2004) mengembangkan *Tri Dog 1* AUV dengan panjang 1.85 m, diameter 0.53 dan massa 170 kg. Naik dan Singh (2007) menggunakan *Biorobotics* AUV dengan panjang 2 m, massa 30.48 kg, Lapierre dan Soesanto (2007) dan Lapierre dkk (2008) mengkaji *Infante* AUV dengan panjang 4.215 m dan massa 23 Kg

Pada tahun 2009, menggunakan NPS II AUV dengan panjang 3 m, diameter 0.25 m dan massa 225 Kg serta kecepatan 3.5 knot. Lapierre (2009) mengkaji

Taipan 2 AUV dengan panjang 1.8 m, diameter 0.2 m dan massa 60 Kg. Andonian dkk (2010) mengkaji DEPTHX AUV dengan bentuk bola di mana volume 1.5 m^3 dengan massa 1500 kg, diikuti oleh Petric dan Stilwell (2010) *Virginia Tech 475* AUV dengan panjang 1 meter, diameter 0.12 meter dan berat 8.5 kg. Craven dkk (2011) mengkaji *Autosub* AUV dengan panjang 7 m, diameter 1 m dan massa 3600 kg. Kim dan Ura (2012) menggunakan r2D4 AUV dengan panjang 4,4 meter dan massa 1510 kg

Pada Tabel 2.3 menjelaskan pemetaan penelitian terdahulu terkait sistem kendali gerak pada AUV dengan yang dilakukan pada penelitian ini

Tabel 2.3. Critical review jurnal terkait sistem kendali gerak AUV

Judul	Penulis	Aspek kajian yang telah dilakukan	Penelitian sekarang
Navigation and control of AUVs via second order Sliding-Mode and Extended Kalman Filtering	Bartolini, G dkk, (2009)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: second-order sliding mode control (2-SMC) 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF 3. Model Fisik AUV: - 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Navigation of an AUV for investigation of underwater structures	Kondo dan Ura (2004)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID dengan Laser Ranging System 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF 3. Model Fisik AUV: <i>Tri Dog I</i> AUV dengan panjang 1.85 m, diameter 0.53 dan massa 170 kg 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Robust diving control of an AUV	Lapierre, L (2009)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: robust diving control berdasar teknik lyapunov dan back-stepping 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF 3. Model Fisik AUV: <i>Taipan 2</i> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi

			AUV dengan panjang 1.8 m, diameter 0.2 m dan massa 60 Kg.	3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Robust Nonlinear Path-Following control of an AUV	Lapierre, L dkk (2008)		<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: nonlinear adaptive control 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF 3. Model Fisik AUV: <i>Infante</i> AUV dengan panjang 4.215 m dan massa 23 Kg 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Design of a sliding mode fuzzy controller for the guidance and control of an autonomous underwater vehicle	Guo, J. dkk (2003)		<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: sliding mode fuzzy controller 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF 3. Model Fisik AUV: AUV HMI 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Adaptive Control for Autonomous Underwater Vehicles	McGann, C. dkk (2008)		<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: adaptive control 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF 3. Model Fisik AUV: - 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi

			3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
3-Dimensional Trajectory Tracking Control of an AUV "R-One Robot" Considering Current Interaction	Kim dan Ura (2002)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Non-linier 6-DOF 3. Model Fisik AUV: <i>R-One Robot</i> AUV dengan panjang 8,3 meter, diameter 1,2 meter dan massa 4400 kg. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Nonlinear path-following control of an AUV	Lapierre dan Soesanto (2007)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: path-following control berdasar teori Lyapunov and teknik backstepping 2. Model Matematis gerakan AUV: Non-linier 6-DOF 3. Model Fisik AUV: <i>Infante</i> AUV dengan panjang 4.215 m dan massa 23 Kg 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Design of an adaptive nonlinear controller for depth control of an autonomous underwater vehicle.	Li dan Lee (2005)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: adaptive nonlinear controller 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF 3. Model Fisik AUV: - 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi

Model simplification for AUV pitch-axis control design.	Petric dan Stilwell (2010)	1. Metode: PID 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 2-DOF (heave dan pitch) 3. Model Fisik AUV: <i>Virginia Tech 475</i> AUV dengan panjang 1 meter, diameter 0.12 meter dan berat 8.5 kg	3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg 1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Trajectory Planning and Tracking Control of Underactuated AUVs*	Repoulas dan Papadopoulos. (2005)	1. Metode: partial state-feedback 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 3-DOF (surge, sway dan yaw) 3. Model Fisik AUV: -	1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Sliding mode control of autonomous underwater vehicle	Akcaya dkk(2009)	1. Metode: SMC 2. Model Matematis gerakan AUV: linier 3-DOF dengan linierisasi menggunakan <i>tool linmod</i> di Matlab	1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks

		3. Model Fisik AUV: NPS II AUV	Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Application of the sliding mode fuzzy controller to the guidance and control of an autonomous underwater vehicle	Chiu dkk (2000)	1. Metode: sliding mode fuzzy control 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 2-DOF (surge dan roll) 3. Model Fisik AUV: <i>Haimin</i> AUV	1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Model predictive control of an autonomous underwater vehicle	Naeem, W. (2002)	1. Metode: model predictive control 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 2-DOF (surge dan yaw) 3. Model Fisik AUV: AUV dengan panjang 7 meter dan diameter 1 meter	1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
The control system of autonomus underwater vehicle	Jalving dan Storkensen (1995)	4. Metode: PID 5. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 5-DOF tanpa roll 6. Model Fisik AUV: NDRE	1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks

			AUV	Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Design of an adaptive nonlinear controller for an autonomous underwater vehicle	Rezazadegan dkk (2013)		1. Metode: adaptive nonlinear controller 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 5-DOF tanpa roll 3. Model Fisik AUV: -	1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Geometric control for autonomous underwater vehicle overcoming a thruster failure	Andonian dkk (2010)		1. Metode: sliding mode fuzzy control 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF 3. Model Fisik AUV: DEPTHX AUV dengan volume massa 1500 kg 1,5 m ³ karena berbentuk lingkaran	1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Adaptive neural network of autonomous underwater vehicle	Forouzantabar dkk (2012)		1. Metode: adaptive neural network dua layer 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF 3. Model Fisik AUV: -	1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks

State dependent riccati equation based robust dive plane control of AUV with control constraints	Naik dan Singh (2007)	<p>1. Metode: robust suboptimal control dengan state-dependent Riccati equation</p> <p>2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 2-DOF (heave dan pitch)</p> <p>3. Model Fisik AUV: <i>Biorobotics</i> AUV dengan panjang 2 m, massa 30.48 kg</p>	<p>Jacobi</p> <p>3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg</p> <p>1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID</p> <p>2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi</p> <p>3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg</p>
Design of sliding mode Autopilot with steady state error estimation for AUV	Shi, J. (2006)	<p>1. Metode: sliding mode Autopilot dengan eliminasi error steady state</p> <p>2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 5-DOF tanpa roll</p> <p>3. Model Fisik AUV: -</p>	<p>1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID</p> <p>2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi</p> <p>3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg</p>
Design and testing of fuzzy logic controller for an AUV	Kanakakis dkk (2001)	<p>1. Metode: Fuzzy Logic Control</p> <p>2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF</p> <p>3. Model Fisik AUV: NPS PHOENIX AUV dengan</p>	<p>1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID</p> <p>2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks</p>

		panjang 7,320 ft	Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Multivariable intelligent control strategies for an autonomous underwater vehicle	Craven dkk (2010)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: adaptive network structure a multivariable Sugeno style fuzzy 2. Model Matematis gerakan AUV: model linear 5-DOF tanpa surge dimana model linear tanpa linearisasi 3. Model Fisik AUV: <i>Autosub</i> AUV 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
GA-based path planning for multiple AUVs	Wu dkk (2008)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: Genetic Algorithm 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF 3. Model Fisik AUV: - 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Three Dimensional Trajectory Control of Underactuated AUVs	Repoulas dan Papadopoulos (2007)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID 2. Model matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF 3. Model Fisik AUV: - 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks

Optimal Guidance for Autonomous Underwater Vehicle Navigation within Undersea Areas of Current Disturbances	Kim dan Ura (2012)	<p>1. Metode: PID</p> <p>2. Model matematis gerakan AUV: Non-linier 6-DOF</p> <p>3. Model Fisik AUV: r2D4 AUV dengan panjang 4,4 meter dan massa 1510 kg</p>	<p>Jacobi</p> <p>3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg</p> <p>1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID</p> <p>2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi</p> <p>3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg</p>
Control and Guidance Approach Using Autonomous Underwater Vehicle	Jantapremjit dkk (2008)	<p>1. Metode: high order SMC (HOSMC)</p> <p>2. Model Matematis gerakan AUV: Non-linier 6-DOF</p> <p>3. Model Fisik AUV: -</p>	<p>1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID</p> <p>2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi</p> <p>3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg</p>
Adaptive Control Schemes for Autonomous Underwater Vehicles	Sun dan Cheah (2009)	<p>4. Metode: adaptive proportional-derivative (PD)</p> <p>5. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF</p> <p>6. Model Fisik AUV: -</p>	<p>1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID</p> <p>2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks</p>

Tracking Control of Autonomous Underwater Vehicles with Internal Oving Mass		<ol style="list-style-type: none"> 1. Menggunakan metode dengan model strong nonlinear 6-DOF 2. Menggunakan teori lyapunov untuk analisa kestabilan 	<p>Jacobi</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Tracking Control of Autonomous Underwater Vehicles with Internal Oving Mass	Wang dkk (2008)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: tracking control dengan berdasar Lyapunov dan backstepping 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 3-DOF (surge, sway dan yaw) 3. Model Fisik AUV: - 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg
Predictive Fuzzy PID Control Method for Underwater Vehicles	Tang dkk (2012)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: Fuzzy-PID controller berdasar generalized predictive control (GPC) 2. Model Matematis gerakan AUV: non-linier 6-DOF 3. Model Fisik AUV: - 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode: PID, SMC dan Sliding-PID 2. Model Matematis gerakan AUV: Linier 6-DOF yang dihasilkan dari linierisasi dengan matriks Jacobi 3. Model Fisik AUV: <i>Segorogeni</i> AUV dengan panjang 0.98 m, diameter 0.18 m dan massa 15 Kg

2.2 DASAR TEORI MODEL GERAKAN AUV

Pada awalnya ada dua hal penting yang dibutuhkan untuk menganalisa AUV, yaitu sistem sumbu yang terdiri dari *Earth Fixed* Frame (EFF) dan *Body Fixed* Frame (BFF) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1 (Yang, 2007). EFF digunakan untuk menjelaskan posisi dan orientasi dari AUV, di mana posisi sumbu- x mengarah ke arah utara, sumbu- y ke arah timur dan sumbu- z ke arah pusat bumi. Sedangkan BFF mendefinisikan sumbu- x positif mengarah ke haluan wahana, sumbu- y positif mengarah ke sisi kanan wahana, dan sumbu- z positif mengarah ke bawah (Fosen, 2005). Sistem BFF digunakan untuk menjelaskan kecepatan dan percepatan dari AUV dengan titik mula berada pada pusat gravitasi.

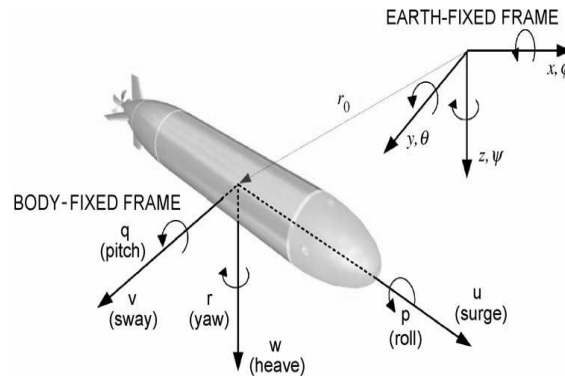
Pergerakan dari AUV memiliki 6 derajat kebebasan (6 DOF) di mana terdiri dari 3 (tiga) derajat kebebasan untuk arah gerak translasi pada sumbu- x , $-y$, dan $-z$ dan 3 (tiga) derajat kebebasan yang lain untuk gerak rotasi terhadap sumbu- x , $-y$, dan $-z$. Deskripsi umum AUV pada 6 DOF dapat dinyatakan dalam persamaan: (Fosen, 2005) :

$$\begin{aligned}\eta &= [\eta_1^T, \eta_2^T]^T, \quad \eta_1 = [x, y, z]^T, \quad \eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T; \\ \nu &= [\nu_1^T, \nu_2^T]^T, \quad \nu_1 = [u, v, w]^T, \quad \nu_2 = [p, q, r]^T; \\ \tau &= [\tau_1^T, \tau_2^T]^T, \quad \tau_1 = [X, Y, Z]^T, \quad \tau_2 = [K, M, N]^T;\end{aligned}\tag{2.1}$$

di mana η menunjukkan vector posisi dan orientasi pada EFF, dengan η_1 yang menyatakan posisi pergerakan translasi dan η_2 sebagai posisi pergerakan rotasi. Notasi ν menunjukkan vektor kecepatan linier dan angular pada BFF, dengan ν_1 mendeskripsikan vektor kecepatan linier dan ν_2 vektor kecepatan angular. Sedangkan τ menyatakan vektor gaya dan momen yang bekerja pada AUV pada BFF, dengan τ_1 sebagai vektor gaya dan τ_2 vektor sebagai momen. T menyatakan transpose dari matriks terkait. Posisi, kecepatan dan gaya serta momen pada BFF dapat dirinci seperti dalam pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Derajat kebebasan AUV (SNAME)

DOF	KETE-RANGAN	GAYA / MOMEN	KEC LINIER/ ANGULAR	POSISI/ SUDUT EULER
1	Surge	X	u	x
2	Sway	Y	v	y
3	Heave	Z	w	z
4	Roll	K	p	ϕ
5	Pitch	M	q	θ
6	Yaw	N	r	ψ



Gambar 2.1. Enam derajat kebebasan gerak AUV (Yang, 2007)

Mengingat dalam kondisi sebenarnya AUV dipengaruhi oleh gerak translasi dan gerak rotasi, maka dalam aplikasi gerak tersebut harus diketahui terlebih dahulu transformasi dari kecepatan linier dan angular sebagai berikut :

1. Transformasi Kecepatan Linier

Lintasan laju AUV terhadap koordinat EFF diperoleh berdasarkan transformasi kecepatan sebagai berikut :

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1 \quad (2.2)$$

di mana $\dot{\eta}_1 = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$, $J_1(\eta_2)$ ialah matriks transformasi yang berhubungan terhadap fungsi dari sudut Euler : roll (ϕ), pitch(θ), dan yaw(ψ), lihat Gambar 2.1. Koordinat rotasi disekitar sumbu-x,-y,-z berdasarkan EFF dapat dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$C_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix};$$

$$C_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix};$$

$$C_{z,\psi} = \begin{bmatrix} \cos \Psi & \sin \Psi & 0 \\ -\sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

dengan menggabungkan ketiga matriks di atas maka akan diperoleh matriks transformasi kecepatan linier dengan cara sebagai berikut (Yang, 2007):

$$J_1(\eta_2) = C_{z,\psi}^T C_{y,\theta}^T C_{x,\phi}^T \quad (2.4)$$

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c \Psi c \theta & c \Psi s \theta s \phi - s \Psi c \phi & s \Psi s \phi + c \Psi c \phi s \theta \\ s \Psi c \theta & s \phi s \theta s \Psi + c \Psi c \phi & -c \Psi s \phi + s \theta \sin \Psi c \phi \\ -s \theta & c \theta s \phi & c \theta c \phi \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

di mana $s \equiv \sin$; $c \equiv \cos$; $t \equiv \tan$

2. Transformasi Kecepatan Anguler

Vektor kecepatan angular, $v_2 = [p, q, r]^T$ pada koordinat BFF dan vektor laju Euler, $\dot{\eta}_2 = [\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T$ saling berhubungan melalui transformasi matriks $J_2(\eta_2)$ berdasarkan persamaan berikut :

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2) v_2 \quad (2.6)$$

di mana orientasi koordinat BFF terhadap koordinat EFF adalah sebagai berikut:

$$v_2 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\phi}^T \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\phi}^T C_{\theta}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2^{-1}(\eta_2) \dot{\eta}_2 \quad (2.7)$$

sehingga

$$J_2^{-1}(\eta_2) \dot{\eta}_2 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} - \sin \theta \dot{\psi} \\ \cos \phi \dot{\theta} + \sin \phi \cos \theta \dot{\psi} \\ -\sin \phi \dot{\theta} + \cos \phi \cos \theta \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \phi & \cos \theta \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

melalui transformasi *inverse* akan diperoleh matriks kecepatan anguler sebagai berikut :

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Hasil matriks transformasi kecepatan linier dan anguler yang sudah diperoleh dapat ditulis dalam bentuk satu matriks sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix} \Rightarrow \dot{\eta} = J(\eta)v \quad (2.10)$$

persamaan umum dari gerak AUV pada 6-DOF akan terdiri dari 3 (tiga) persamaan pertama untuk gerak translasi dan 3 (tiga) persamaan kedua untuk gerak rotasi, yaitu dapat dituliskan sebagai berikut:

Surge:

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \approx X \quad (2.11)$$

Sway :

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})] \approx Y \quad (2.12)$$

Heave :

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] \approx Z \quad (2.13)$$

Roll:

$$I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \approx K \quad (2.14)$$

Pitch :

$$I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] \approx M \quad (2.15)$$

Yaw :

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] \approx N \quad (2.16)$$

Persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk yang lebih ringkas, yaitu :

$$\mathbf{M}_{RB} \dot{v} + \mathbf{C}_{RB}(v)v = \tau \quad (2.17)$$

di mana $v = [u, v, w, p, q, r]^T$ adalah vektor untuk kecepatan linier dan angular, $\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ adalah gaya dan momen eksternal yang bekerja pada AUV, (x_G, y_G, z_G) adalah posisi dari pusat massa pada koordinat BFF, \mathbf{M}_{RB} adalah matriks inersia yang didalamnya terdapat (I_x, I_y, I_z) dan \mathbf{C}_{RB} adalah matriks coriolis dan sentripetal, dengan notasi RB sebagai *round body* atau lambung silinder dari AUV. Bentuk dari matriks \mathbf{M}_{RB} dan \mathbf{C}_{RB} itu sendiri adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{RB} &= \begin{bmatrix} m\mathbf{I}_{3 \times 3} & -m\mathbf{S}(\mathbf{r}_G) \\ m\mathbf{S}(\mathbf{r}_G) & \mathbf{I}_o \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.18)$$

dimana $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ menyatakan matriks identitas 3x3, $\mathbf{S}(\cdot)$ menyatakan matriks simetris skew 3x3, sebagai contoh:

$$\mathbf{S}(\mathbf{r}_G) = -\mathbf{S}^T(\mathbf{r}_G) = \begin{bmatrix} 0 & -z_G & y_G \\ z_G & 0 & -x_G \\ -y_G & x_G & 0 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Matriks $\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})$ biasanya memiliki bentuk simetris skew, yaitu

$$\mathbf{C}_{RB} = -\mathbf{C}_{RB}^T :$$

$$\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & -m\mathbf{S}(\mathbf{v}_1) - m\mathbf{S}(\mathbf{v}_2)\mathbf{S}(\mathbf{r}_G) \\ -m\mathbf{S}(\mathbf{v}_1) + m\mathbf{S}(\mathbf{r}_G)\mathbf{S}(\mathbf{v}_2) & -\mathbf{S}(\mathbf{I}_0\mathbf{v}_2) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(y_G q + z_G r) & m(w - x_G q) & m(-v - x_G r) \\ 0 & 0 & 0 & m(-w - y_G p) & m(z_G r + x_G p) & m(u - y_G r) \\ 0 & 0 & 0 & m(v - z_G p) & m(-u - z_G q) & m(x_G p + y_G q) \\ m(y_G q - z_G r) & m y_G p & m z_G p & 0 & I_z r & -I_y q \\ m x_G q & m(-z_G r - x_G p) & m z_G q & I_x r & 0 & -I_z r \\ m x_G r & m y_G r & m(-x_G p - y_G q) & I_y q & -I_z p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

2.2.1 Gaya Luar dan Momen

Dinamika AUV sangat dipengaruhi oleh gaya dan momen yang bekerja pada AUV tersebut. Gaya dan momen, τ_{RB} , akan terdiri dari 5 (lima) komponen sebagai berikut (Yang, 2007):

$$\tau_{RB} = \tau_{hydrostatic} + \tau_{addedmass} + \tau_{drag} + \tau_{lift} + \tau_{thrust} \quad (2.21)$$

Gaya Hidrostatik. Setiap benda yang berada di dalam air akan mengalami gaya hidrostatik, yang terdiri dari gaya gravitasi atau gaya berat dan gaya apung. Gaya ini dapat dituliskan dalam bentuk persamaan berikut:

$$\tau_{hydrostatic} = \tau_G + \tau_B \quad (2.22)$$

dengan τ_G sebagai gaya berat dan τ_B sebagai gaya apung. Dalam sejumlah referensi kedua sub-komponen gaya ini juga dituliskan sebagai:

$$W = mg \text{ dan } B = \rho g \nabla \quad (2.23)$$

di mana W sebagai gaya berat atau gaya gravitasi, B sebagai gaya apung, m sebagai massa benda, g sebagai percepatan gravitasi, ρ sebagai massa jenis fluida, dan ∇ sebagai volume benda yang tercelup dalam fluida.

Dalam bentuk matriks, vektor dari gaya gravitasi dalam koordinat EFF dituliskan sebagai:

$$\tau_G = [0 \quad 0 \quad W]^T \quad (2.24)$$

dengan memanfaatkan persamaan transformasi (2.2) dan matriks transformasi (2.5), akan diperoleh matriks vektor gaya gravitasi (τ'_G) dalam sistem sumbu BFF sebagai berikut:

$$\tau'_G = J_1^{-1}(\eta_2)\tau_G \quad (2.25)$$

$$= \begin{bmatrix} c\Psi c\theta & s\Psi c\theta & -s\theta \\ -s\Psi c\phi + c\Psi s\theta s\phi & c\Psi c\theta + s\phi s\theta s\Psi & c\theta s\phi \\ s\Psi s\phi + c\Psi c\phi s\theta & -c\Psi s\phi + s\theta s\Psi c\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$\tau'_G = \begin{bmatrix} -\sin\theta W \\ \cos\theta \sin\phi W \\ \cos\theta \cos\phi W \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Notasi $s = \sin$; $c = \cos$; $t = \tan$

Dalam koordinat BFF, τ'_G akan menghasilkan momen yang berkaitan dengan titik awal, yaitu:

$$M_G = r_G \times \tau'_G = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -\sin\theta W \\ \cos\theta \sin\phi W \\ \cos\theta \cos\phi W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_G \cos\theta \cos\phi W - z_G \cos\theta \sin\phi W \\ -z_G \sin\theta W - x_G \cos\theta \cos\phi W \\ x_G \cos\theta \sin\phi W + y_G \sin\theta W \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

di mana $r_G = [x_G \ y_G \ z_G]$ adalah vektor posisi dari pusat massa pada koordinat BFF.

Dengan menggabungkan persamaan (2.22) dan (2.23) maka diperoleh komponen gaya gravitasi dalam gaya hidrostatik sebagai berikut:

$$\tau'_g = \begin{bmatrix} -\sin\theta W \\ \cos\theta \sin\phi W \\ \cos\theta \cos\phi W \\ y_G \cos\theta \cos\phi W - z_G \cos\theta \sin\phi W \\ -z_G \sin\theta W - x_G \cos\theta \cos\phi W \\ x_G \cos\theta \sin\phi W + y_G \sin\theta W \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

selanjutnya, bentuk matriks vektor dari gaya apung dalam koordinat EFF mempunyai bentuk:

$$\tau_B = [0 \ 0 \ -B]^T \quad (2.30)$$

di mana gaya apung bernilai negatif karena mempunyai arah gaya yang berlawanan dengan arah sumbu-z positif. Sama halnya dengan gaya gravitasi, pada koordinat BFF terdapat matriks vektor gaya apung (τ'_B) sebagai berikut:

$$\tau'_B = J_1^{-1}(\eta_2)\tau_B = \begin{bmatrix} \sin\theta B \\ -\cos\theta \sin\phi B \\ -\cos\theta \cos\phi B \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

dan momen yang dihasilkan oleh gaya apung adalah:

$$M_B = r_b \times \tau'_B = \begin{bmatrix} -y_b \cos \theta \cos \phi B + z_b \cos \theta \sin \phi B \\ z_b \sin \theta B + x_b \cos \theta \cos \phi B \\ -x_b \cos \theta \sin \phi B - y_b \sin \theta B \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

di mana $r_b = [x_b \ y_b \ z_b]$ sebagai vektor posisi dari pusat gaya apung dalam koordinat BFF. Dengan menggabungkan persamaan (2.31) dan (2.32) maka diperoleh komponen gaya apung untuk gaya hidrostatik sebagai berikut:

$$\tau'_b = \begin{bmatrix} \sin \theta B \\ -\cos \theta \sin \phi B \\ -\cos \theta \cos \phi B \\ -y_b \cos \theta \cos \phi B + z_b \cos \theta \sin \phi B \\ z_b \sin \theta B + x_b \cos \theta \cos \phi B \\ -x_b \cos \theta \sin \phi B - y_b \sin \theta B \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Dengan menggabungkan sub-komponen gaya gravitasi dan gaya apung pada maka diperoleh matriks gaya hidrostatik di bawah ini:

$$\tau_{hydrostatic} = \tau_G + \tau_B = \begin{bmatrix} -(W - B) \sin \theta \\ (W - B) \cos \theta \sin \phi \\ (W - B) \cos \theta \cos \phi \\ (y_G W - y_b B) \cos \theta \cos \phi - (z_G W - z_b B) \cos \theta \sin \phi \\ -(z_G W - z_b B) \sin \theta - (x_G W - x_b B) \cos \theta \cos \phi \\ (x_G W - x_b B) \cos \theta \sin \phi + (y_G W - y_b B) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Melihat pada persamaan (2.34), jika nilai dari gaya gravitasi (W), gaya apung (B), pusat gravitasi (r_G) dan pusat gaya apung (r_b) semuanya diketahui maka nilai dari gaya hidrostatik juga akan dapat diketahui.

Gaya Hidrodinamik. Komponen gaya hidrodinamik terdiri dari gaya massa tambah (*added mass force*), gaya hambatan (*drag force*), dan gaya angkat (*lift force*). Melihat kembali ke persamaan (2.17), persamaan pada ruas sebelah kiri menyatakan karakteristik gerak dari AUV dengan massa m . Dengan memakai analogi maka efek dari massa tambah dan berdasarkan rancangannya, sebuah AUV akan memiliki 2 (dua) bidang simetris, yaitu OXY dan OXZ yang dapat dituliskan dalam bentuk persamaan berikut:

$$\tau_{addedmass} = M_A \ddot{v} + C_A(v)v \quad (2.35)$$

di mana

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & Y_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{\dot{w}} & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & N_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\mathbf{S}(\mathbf{A}_{11}\mathbf{v}_1 + \mathbf{A}_{12}\mathbf{v}_2) \\ -\mathbf{S}(\mathbf{A}_{11}\mathbf{v}_1 + \mathbf{A}_{12}\mathbf{v}_2) & -\mathbf{S}(\mathbf{A}_{21}\mathbf{v}_1 + \mathbf{A}_{22}\mathbf{v}_2) \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

di mana $X_{\dot{u}}$ sebagai *added mass* dari pergerakan translasi pada arah sumbu-x, dan notasi $Y_{\dot{v}}$ sebagai *added mass* dari pergerakan translasi pada arah sumbu-y. Notasi $Z_{\dot{w}}$ sebagai *added mass* dari pergerakan translasi pada arah sumbu-z, berikutnya notasi $K_{\dot{p}}$ sebagai *added mass* inersia dari pergerakan rotasi terhadap arah sumbu-x. Notasi $M_{\dot{q}}$ sebagai *added mass* inersia dari pergerakan rotasi terhadap arah sumbu-y, dan notasi $N_{\dot{r}}$ sebagai *added mass* inersia dari pergerakan rotasi terhadap arah sumbu-z. Notasi $Y_{\dot{r}}$ sebagai *added mass* dari pergerakan rotasi terhadap arah sumbu-y, dan $Z_{\dot{q}}$ sebagai *added mass* dari pergerakan rotasi terhadap arah sumbu-y. Notasi $M_{\dot{w}}$ *added mass* inersia dari pergerakan translasi pada arah sumbu-z, dan $N_{\dot{v}}$ *added mass* inersia dari pergerakan translasi pada arah sumbu-y.

dengan terlebih dahulu menentukan koefisien-koefisien massa tambah melalui metode *modular modeling* maka penjabaran persamaan (2.35) akan menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$X_A = X_{\dot{u}}\dot{u} + Z_{\dot{w}}w\dot{q} + Z_{\dot{q}}q^2 - Y_{\dot{v}}vr - Y_{\dot{r}}r^2$$

$$Y_A = Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + X_{\dot{u}}ur - Z_{\dot{w}}wp - Z_{\dot{q}}pq$$

$$Z_A = Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} - X_{\dot{u}}uq + Y_{\dot{v}}vp + Y_{\dot{r}}rp$$

$$K_A = K_{\dot{p}}\dot{p}$$

$$M_A = M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} - (Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}})uw - Y_{\dot{r}}vp + (K_{\dot{p}} - N_{\dot{r}})rp - Z_{\dot{q}}uq$$

$$N_A = N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} - (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})uv + Z_{\dot{q}}wp - (K_{\dot{p}} - M_{\dot{q}})pq - Y_{\dot{r}}ur \quad (2.40)$$

dengan mensubstitusi koefisien massa tambah yang telah diketahui ke dalam persamaan di atas maka akan didapatkan gaya dan momen terkait dalam 6-DOF.

Komponen berikutnya, gaya hambatan fluida (*drag force*), yang bekerja pada AUV terdiri akan terdiri dari 2 (dua) sub-komponen, yaitu sub-komponen hambatan linier (D_L) dan kuadratik (D_Q), yang dapat dituliskan dalam persamaan:

$$\tau_{drag} = D(v) = \{D_L + D_Q|v|\} \quad (2.41)$$

dengan

$$D_L = \{X_{u|u}| Y_{v|v}| Z_{w|w}| K_{p|p}| M_{q|q}| N_{r|r}|\} \quad (2.42)$$

$$D_Q = \{Y_{r|r}| Z_{q|q}| M_{w|w}| N_{v|v}|\} \quad (2.43)$$

$$X_{uu} = \rho V S_{ref} (C_L \alpha - C_D); \quad Z_{ww} = \frac{1}{V} \frac{\partial Z}{\partial \alpha} = \frac{1}{V} \left(-\frac{1}{2} \rho V^2 S_{ref} C_D \right) \quad (2.44)$$

di mana $X_{u|u}|$ mendeskripsikan gaya hambatan pada pergerakan surge, dan $Y_{v|v}|$ sebagai gaya hambatan pada pergerakan sway. Notasi $Z_{w|w}|$ menyatakan gaya hambatan pada pergerakan heave, dan $K_{p|p}|$ sebagai gaya hambatan pada pergerakan roll. Notasi $M_{q|q}|$ sebagai gaya hambatan pada pergerakan pitch, $N_{r|r}|$ sebagai gaya hambatan pada pergerakan yaw. Notasi $Y_{r|r}|$ merupakan gaya hambatan pada pergerakan yaw, dan $Z_{q|q}|$ sebagai gaya hambatan pada pergerakan sway. Notasi $M_{w|w}|$ menyatakan gaya hambatan pada pergerakan heave, dan $N_{v|v}|$ yaitu gaya hambatan pada pergerakan yaw.

Komponen selanjutnya, gaya angkat (*lift force*), dengan persamaan gaya angkat (L) dan gaya apung hambat (D) adalah

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho V_{fin}^2 S_{fin}; \quad D = \frac{1}{2} \rho V_{fin}^2 S_{fin} \quad (2.46)$$

di mana C_L dan C_D merupakan koefisien *lift* dan *drag* dari fin , S_{fin} adalah luas kontak area (*planform*) dari fin , V_{fin} adalah kecepatan efektif dari fin .

Koefisien hidrodinamika dari gaya dan momen *lift* dari fin dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Y_{uu} \delta_r = -\rho C_{L\alpha} S_{fin}$$

$$Z_{uu} \delta_s = -\rho C_{L\alpha} S_{fin}$$

$$M_{uu} \delta_s = \rho C_{L\alpha} S_{fin} x_{fin}$$

$$N_{uu} \delta_r = -\rho C_{L\alpha} S_{fin} x_{fin} \quad (2.47)$$

di mana $c_{L\alpha} = \left[\frac{1}{2\alpha\pi} + \frac{1}{\pi AR_e} \right]^{-1}$

dengan $Y_{uu\delta_r}$ dan $Z_{uu\delta_s}$ adalah gaya lift fin, notasi $M_{uu\delta_s}$ dan $N_{uu\delta_r}$ adalah momen lift fin. Notasi $C_{L\alpha}$ adalah koefisien *lift* akibat perubahan sudut δ dan S_{fin} mendeskripsikan luas kontak area (*planform*) dari *fin*, serta x_{fin} adalah jarak antara pusat koordinat AUV dan pusat tekanan *fin*. Notasi $\bar{\alpha}$ nilai faktor aproksimasi yang diberikan oleh Hoerner (1965) dan AR_e aspek rasio efektif fin.

Gaya Dorong. Disamping menggunakan *fin* untuk mengontrol keseimbangan, AUV juga memerlukan mekanisme untuk dapat bergerak melaju, gerak melaju dapat dihasilkan oleh *propeller*, yang menghasilkan gaya dan momen ke arah sumbu- x . Gaya dorong X_{prop} dan momen dorong K_{prop} yang dihasilkan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$X_{prop} = \frac{1}{2} \rho D^4 K_T(J) |\omega_p| \omega_p \quad (2.48)$$

$$K_{prop} = \frac{1}{2} \rho D^5 K_T(J) |\omega_p| \omega_p \quad (2.49)$$

dengan D sebagai diameter *propeller*, ω_p adalah kecepatan putar *propeller*, K_T adalah koefisien gaya *thrust*, $J = \frac{V_a}{\omega_p D}$ adalah *advance number*, $V_a = (1 - \alpha)u$ adalah *advance speed* pada *propeller*, α adalah *wake fraction numbers* yang mempunyai harga sekitar $0,1 \sim 0,4$.

Setelah diketahui Gaya dorong X_{prop} dan momen dorong K_{prop} dari satu propeller, maka dapat dicari keseluruhan gaya dan momen yang dihasilkan oleh propeller pada 6-DOF sebagai berikut:

$$F_{3 \times 1} = \sum_{i=1}^n T_i \quad (2.50)$$

$$M_{3 \times 1} = \sum_{i=1}^n \tau_i + r_{ti} \times T_i \quad (2.51)$$

Dimana $F_{3 \times 1}$ menyatakan gaya pada arah $-x$, $-y$, dan $-z$.; $M_{3 \times 1}$ menyatakan momen terhadap sumbu- x , $-y$, dan $-z$.

2.2.2 Gaya dan Momen Total

Gaya dan momen total yang bekerja pada AUV dapat diperoleh dengan menggabungkan persamaan gaya hidrostatik, gaya hidrodinamik dan gaya dorong.

Dalam hal ini diasumsikan tensor inersia diagonal (I_o) adalah nol, sehingga diperoleh gaya dan momen total dari keseluruhan model sebagai berikut:

Surge:

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = X_{res} + X_{|u|u}u|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop} \quad (2.52)$$

Sway:

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})] = Y_{res} + Y_{|v|v}v|v| + Y_{r|r|r}|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r \quad (2.53)$$

Heave:

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] = Z_{res} + Z_{|w|w}w|w| + Z_{q|q|q}|q| + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{uu\delta_s}u^2\delta_s \quad (2.54)$$

Roll:

$$I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = K_{res} + K_{p|p|p}|p| + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{prop} \quad (2.55)$$

Pitch :

$$I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M_{res} + M_{w|w|w}|w| + M_{q|q|q}|q| + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uu\delta_s}u^2\delta_s \quad (2.56)$$

Yaw:

$$I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = N_{res} + N_{v|v|v}|v| + N_{r|r|r}|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r \quad (2.57)$$

2.2.3 Transformasi Posisi

Model linier maupun non-linier 6-DOF yang dalam persamaan awalnya diidentifikasi dalam bentuk kinematika, yakni komponen kecepatan linier dan angular, perlu ditransformasikan ke dalam bentuk persamaan posisi pada arah

sumbu sumbu- x , $-y$, $-z$. Transformasi ini oleh Ataei (2015) dinyatakan dapat diestimasi dengan memakai persamaan di bawah ini:

$$\dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi \quad (2.58)$$

$$\dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi \quad (2.59)$$

$$\dot{z} = w \quad (2.60)$$

$$\dot{\psi} = r \quad (2.61)$$

Model kinematika di atas berfungsi untuk merubah hasil estimasi gerak ke dalam bentuk posisi terhadap sumbu- x , $-y$ dan $-z$.

2.2.4 Linierisasi

Sistem persamaan non-linier orde-satu secara umum dapat dituliskan dalam bentuk:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= f(x, y) \\ \frac{dy}{dt} &= g(x, y) \end{aligned} \quad (2.62)$$

persamaan (2.62) dapat dibentuk menjadi sistem persamaan linier:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ \dot{y} &= C(t)y(t) + D(t)v(t) \end{aligned} \quad (2.63)$$

Pada persamaan (2.62) f dan g merupakan persamaan non-linier dalam x dan y , merupakan variabel yang bergantung terhadap waktu t . Sistem pada persamaan (2.62) merupakan sistem *autonomous* dimana t tidak muncul secara eksplisit di dalamnya.

Bila dimisalkan bahwa titik kesetimbangan sebagai hasil penyelesaian dari persamaan sistem adalah (x_0, y_0) , maka untuk titik (x, y) di sekitar titik kesetimbangan fungsi f dan g dapat didekati dengan ekspansi deret Taylor. Menurut Ogata (2010) pendekatan itu diberikan dalam bentuk:

$$\begin{aligned} f(x, y) &\approx f(x_0, y_0) + (x - x_0) \frac{\partial f(x_0, y_0)}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial f(x_0, y_0)}{\partial y} + R_1(x_0, y_0) \\ g(x, y) &\approx g(x_0, y_0) + (x - x_0) \frac{\partial g(x_0, y_0)}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial g(x_0, y_0)}{\partial y} + R_2(x_0, y_0) \end{aligned} \quad (2.64)$$

Dengan $\lim_{r \rightarrow 0} \frac{R(x_0, y_0)}{r} = 0, r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$. Dikarenakan (x_0, y_0) adalah merupakan titik setimbang, maka $f(x_0, y_0) = g(x_0, y_0) = 0$

Linierisasi dari sistem di sekitar titik kesetimbangan dapat dinyatakan dengan menggunakan matriks Jacobi sebagai berikut:

$$\frac{\partial f(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x} & \frac{\partial f(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x} & \dots & \frac{\partial f(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x} & \frac{\partial f(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x} & \dots & \frac{\partial f(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

Bila matriks Jacobi sebagaimana diberikan pada persamaan (2.64) diterapkan dalam linierisasi model non-linier AUV untuk 6-DOF, maka akan diperoleh bentuk persamaan di bawah ini:

$$\frac{\partial f(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial u} & \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial v} & \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial w} & \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial p} & \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial q} & \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial r} \\ \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial u} & \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial v} & \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial w} & \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial p} & \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial q} & \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial r} \\ \frac{\partial f_3(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial u} & \frac{\partial f_3(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial v} & \frac{\partial f_3(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial w} & \frac{\partial f_3(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial p} & \frac{\partial f_3(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial q} & \frac{\partial f_3(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial r} \\ \frac{\partial f_4(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial u} & \frac{\partial f_4(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial v} & \frac{\partial f_4(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial w} & \frac{\partial f_4(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial p} & \frac{\partial f_4(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial q} & \frac{\partial f_4(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial r} \\ \frac{\partial f_5(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial u} & \frac{\partial f_5(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial v} & \frac{\partial f_5(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial w} & \frac{\partial f_5(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial p} & \frac{\partial f_5(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial q} & \frac{\partial f_5(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial r} \\ \frac{\partial f_6(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial u} & \frac{\partial f_6(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial v} & \frac{\partial f_6(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial w} & \frac{\partial f_6(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial p} & \frac{\partial f_6(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial q} & \frac{\partial f_6(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial r} \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

2.3. SISTEM NAVIGASI DAN PANDUAN

Pada penelitian ini digunakan 3 (tiga) metode untuk diterapkan dalam sistem navigasi dan panduan, yakni Kalman Filter (KF), Ensemble Kalman Filter (EnKF) dan Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR). Kedua metode yang terakhir, yaitu EnKF dan EnKF-SR, adalah merupakan hasil pengembangan dari metode KF.

2.3.1 Metode Kalman Filter

Kalman Filter (KF) merupakan suatu metode estimasi variabel keadaan dari sistem dinamik stokastik linier diskrit yang meminimumkan kovarian error estimasi. Metode KF pertama kali diperkenalkan oleh R.E. Kalman pada tahun 1960 (Kalman, 1960). Dalam kajiannya Kalman (1960) menunjukkan bahwa suatu

sistem dinamik stokastik linier diskrit secara umum dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + G_k w_k \quad (2.66)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (2.67)$$

$$x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_{x_0}); w_k \sim N(0, Q_k); v_k \sim N(0, R_k) \quad (2.68)$$

dengan x_0 sebagai inisial dari sistem, dan x_{k+1} merupakan variabel keadaan pada waktu $k+1$ dan berdimensi $n \times 1$. Notasi x_k menyatakan variabel keadaan pada waktu k yang nilai estimasi awalnya \bar{x}_0 dan kovarian awal P_{x_0} , $x_k \in \mathcal{R}^n$, dan notasi u_k menandakan vektor masukan deterministik pada waktu k , $u_k \in \mathcal{R}^m$. Notasi w_k sebagai noise pada sistem dengan mean $\bar{w}_k = 0$ dan kovarian Q_k , dan z_k mendeskripsikan variabel pengukuran, $z_k \in \mathcal{R}^p$. Notasi v_k menunjukkan noise pada pengukuran dengan mean $\bar{v}_k = 0$ dan kovarian R_k , dan notasi A_k, B_k, G_k merupakan matriks-matriks dengan nilai elemen-elemennya adalah variabel masing-masing.

Pada metode KF, estimasi dilakukan dalam dua tahapan, yaitu, pertama, dengan cara memprediksi variabel keadaan berdasarkan sistem dinamik yang disebut tahap prediksi (*time update*) dan selanjutnya tahap koreksi (*measurement update*) terhadap data-data pengukuran untuk memperbaiki hasil estimasi.

Pada tahap prediksi dinamika sistem dirumuskan dalam bentuk variabel keadaan, dengan menggunakan persamaan estimasi variabel keadaan. Tingkat akurasi hasil estimasi dihitung menggunakan persamaan kovarian error. Pada tahap koreksi hasil estimasi variabel keadaan yang diperoleh pada tahap prediksi dikoreksi menggunakan model pengukuran. Salah satu bagian dari tahap ini adalah menentukan matriks Kalman Gain, yang digunakan untuk meminimumkan kovarian error. Tahap prediksi dan koreksi dilakukan secara rekursif dengan cara meminimumkan kovariansi kesalahan estimasi $(x_k - \hat{x}_k)$, notasi x_k merupakan variabel keadaan sebenarnya dan \hat{x}_k sebagai penaksiran dari variabel keadaan. Selanjutnya formulasi di atas dikembangkan menjadi Algoritma Kalman Filter yang dapat dirangkum seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Algoritma Kalman Filter (Kalman, 1960)

Model sistem dan Model Pengukuran	
$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + G_k w_k$ $z_k = H_k x_k + v_k$ $x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_{x_0}); w_k \sim N(0, Q_k); v_k \sim N(0, R_k)$	
Inisialisasi	
$\hat{x}_0 = \bar{x}_0$ $P_0 = P_{x_0}$	
Tahap Prediksi	
Estimasi : $\hat{x}_{k+1}^- = A_k \hat{x}_k + B_k u_k$ Kovarian error : $P_k^- = A_k P_k A_k^T + G_k Q_k G_k^T$	
Tahap Koreksi	
Kalman Gain : $K_{k+1} = P_{k+1}^- H_{k+1}^T (H_{k+1} P_{k+1}^- H_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1}$ Estimasi : $\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_{k+1}^- + K_{k+1} (z_{k+1} - H_{k+1} \hat{x}_{k+1}^-)$ Kovarian error : $P_{k+1} = [I - K_{k+1} H_{k+1}] P_{k+1}^-$	

Algoritma Kalman Filter di atas terdiri dari empat bagian. Bagian pertama mendefinisikan model sistem dan model pengukuran, bagian kedua merupakan nilai awal (inisialisasi), selanjutnya bagian ketiga dan keempat masing-masing adalah tahap prediksi dan koreksi.

2.3.2 Metode Ensemble Kalman Filter

Metode Ensemble Kalman Filter (EnKF) adalah metode estimasi modifikasi dari algoritma Kalman Filter yang dapat digunakan untuk mengestimasi model sistem linier maupun non-linier dengan membangkitkan atau menggunakan sejumlah *ensemble* pada tahap prediksi untuk mengestimasi kovarian errornya (Evensen, 2009). Sehubungan dengan ini telah diturunkan bentuk umum sistem dinamik non-linier pada EnKF sebagai berikut ini:

$$x_{k+1} = f(k, x_k) + w_k \quad (2.69)$$

dengan pengukuran linier $z_k \in \Re^p$ yaitu :

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (2.70)$$

$$x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_{x_0}); w_k \sim N(0, Q_k); v_k \sim N(0, R_k)$$

Dalam persamaan di atas z_k adalah matriks koreksi, H menunjukkan matriks pengukuran, Q_k merepresentasikan variansi *noise* dari sistem, dan R_k adalah variansi *noise* pengukuran. Notasi-notasi lain adalah sebagaimana dijelaskan sebelumnya.

Proses estimasi pada EnKF diawali dengan membangkitkan sejumlah N_e *ensemble* dengan mean 0 dan kovarian 1. Pembangkitan *ensemble* dilakukan secara random dan berdistribusi normal. Misalkan akan dibangkitkan sejumlah N_e *ensemble* untuk $X_{0,i} = [x_{0,1} \ x_{0,2} \ x_{0,3} \ \dots \ x_{0,N_e}]$, maka untuk tahap prediksi dan koreksi adalah sama dengan metode KF. Tetapi sebelum masuk ke tahap prediksi, *mean ensemblenya* harus ditentukan terlebih dahulu, dengan memakai persamaan:

$$\hat{x}_k^* = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^N x_{k,i} \quad (2.71)$$

dan untuk kovarian error P_k , adalah:

$$P_k = \frac{1}{N_e - 1} \sum_{i=1}^N (\hat{x}_{k,i}^- - \hat{x}_k^-)(\hat{x}_{k,i}^- - \hat{x}_k^-)^T \quad (2.72)$$

Persamaan (2.71) digunakan pada tahap prediksi dan tahap koreksi untuk menghitung estimasi masing-masing \hat{x}_k^- dan \hat{x}_k . Sedangkan persamaan (2.72) hanya digunakan untuk kovarian pada tahap prediksi. Pada EnKF, *noise* sistem w_k pada tahap prediksi dan *noise* pengukuran v_k pada tahap koreksi dibangkitkan dalam bentuk *ensemble*. Berikutnya, formulasi di atas dikembangkan menjadi Algoritma Ensemble Kalman Filter yang dapat dirangkum seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.6 (Herlambang, 2012).

Tabel 2.6. Algoritma Ensemble Kalman Filter (Evensen, 2009)

Model sistem dan Model Pengukuran	
$x_{k+1} = f(u_k, x_k) + w_k, w_k \sim N(0, Q_k)$ $z_k = Hx_k + v_k, v_k \sim N(0, R_k)$	
Inisialisasi	
Bangkitkan N ensemble sesuai estimasi awal \bar{x}_0 $x_{0,i} = [x_{0,1} \quad x_{0,2} \quad x_{0,3} \quad \dots \quad x_{0,Ne}]$ Tentukan nilai awal : $\hat{x}_0 = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^N x_{0,i}$	
Tahap Prediksi	
$\hat{x}_{k,i}^- = f(\hat{x}_{k-1,i}, u_{k-1,i}) + w_{k,i}$ dengan $w_{k,i} \sim N(0, Q_k)$ Estimasi : $\hat{x}_k^- = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^N \hat{x}_{k,i}^-$ Kovariansi error : $P_k^- = \frac{1}{N_e - 1} \sum_{i=1}^N (\hat{x}_{k,i}^- - \hat{x}_k^-)(\hat{x}_{k,i}^- - \hat{x}_k^-)^T$	
Tahap Koreksi	
$z_{k,i} = z_k + v_{k,i}$ dengan $v_{k,i} \sim N(0, R_k)$ Kalman gain : $K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R_k)^{-1}$ Estimasi : $\hat{x}_{k,i} = \hat{x}_{k,i}^- + K_k (z_{k,i} - H \hat{x}_{k,i}^-)$ $\hat{x}_k = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^N \hat{x}_{k,i}$ Kovariansi error : $P_k = [I - K_k H] P_k^-$	

2.3.3 Algoritma Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR)

Algoritma Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR) adalah pengembangan dari algoritma EnKF pada tahap koreksi, di mana terdapat *Singular Value Decomposition* (SVD) dan matriks akar kuadrat. SVD adalah suatu matriks dalam bentuk perkalian matriks diagonal yang berisi nilai-nilai singularnya, dengan matriks yang berisi vektor-vektor singular yang bersesuaian (Apriliani dan Sanjaya, 2007). Dekomposisi nilai singular merupakan teknik yang telah digunakan secara luas untuk mendekomposisikan matriks ke dalam beberapa matriks komponen (Hasbullah, 2011).

Jika dalam suatu matriks $\mathbf{A} \in R^{m \times k}$, terdapat matriks *ortogonal* $U = [u_1, \dots, u_m] \in R^{m \times k}$, dan $V = [v_1, \dots, v_m] \in R^{k \times k}$, maka:

$$\mathbf{A} = U \Sigma V^T \quad (2.73)$$

dengan matriks $\Sigma \in R^{m \times k}$ yang entri diagonalnya $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_p \geq 0$, $p = \min[m, k]$ dan entri yang lain adalah nol. Nilai $\sigma_i \geq 0$, $i = 1, 2, \dots, p$ disebut *nilai singular* dari \mathbf{A} (Golub dan Loan, 1993).

Matriks akar kudrat adalah akar kuadrat dari matriks *definit positif* \mathbf{A} , yaitu

$$A^{1/2} = \sum_{i=1}^k \sqrt{\lambda_i} e_i e_i^T = U \Lambda^{1/2} U^T \quad (2.74)$$

di mana $\Lambda^{1/2}$ adalah matriks diagonal dengan element diagonalnya $\sqrt{\lambda_i}$ dengan

$$\Lambda_{(k \times k)} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_k \end{bmatrix} \text{ dan } \lambda_i > 0. \text{ Variabel } \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k \text{ adalah nilai eigen dari}$$

A. Berikutnya, formulasi di atas dikembangkan menjadi Algoritma Ensemble Kalman Filter Square Root yang dapat dirangkum seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.7.

Tabel 2.7. Algoritma Ensemble Kalman Filter Square Root (Herlambang, 2012)

Model sistem dan Model Pengukuran	
$x_{k+1} = f(u_k, x_k) + w_k$, $w_k \sim N(0, Q_k)$ $z_k = Hx_k + v_k$, $v_k \sim N(0, R_k)$	
Inisialisasi	
Bangkitkan N <i>ensemble</i> sesuai dengan tebakan awal \bar{x}_0 $x_{0,i} = [x_{0,1} \ x_{0,2} \ x_{0,3} \ \dots \ x_{0,N}]$ Mean <i>Ensemble</i> awal : $\bar{x}_{0,i} = x_{0,i} 1_N$ <i>Ensemble</i> error awal : $\tilde{x}_{0,i} = x_{0,i} - \bar{x}_{0,i} = x_{0,i} (I - 1_N)$	
Tahap Prediksi	
$\hat{x}_{k,i}^- = f(\hat{x}_{k-1,i}^-, u_{k-1,i}) + w_{k,i}$ dimana $w_{k,i} \sim N(0, Q_k)$ Mean <i>Ensemble</i> : $\bar{x}_{k,i}^- = \hat{x}_{k,i}^- 1_N$ Error <i>Ensemble</i> : $\tilde{x}_{k,i}^- = \hat{x}_{k,i}^- - \bar{x}_{k,i}^- = \hat{x}_{k,i}^- (I - 1_N)$	

Tahap Koreksi	
$z_{k,i} = z_k + v_{k,i}$ dimana $v_{k,i} \sim N(0, R_k)$	
$S_k = H\tilde{x}_{k,i}^-$, $E_k = (v_1, v_2, \dots, v_N)$, and $C_k = S_k S_k^T + E_k E_k^T$	
Mean Ensemble: $\bar{x}_{k,i} = \bar{x}_{k,i}^- + \tilde{x}_{k,i}^- S_k^T C_k^{-1} (\bar{z}_{k,i} - H\bar{x}_{k,i}^-)$	
Skema Akar kuadrat:	
- dekomposisi nilai eigen dari $C_k = U_k \Lambda_k U_k^T$	
- menghitung matriks $M_k = \Lambda_k^{-1/2} U_k^T S_k^-$	
- menentukan SVD dari $M_k = Y_k L_k V_k^T$	
Error Ensemble : $\tilde{x}_{k,i} = \tilde{x}_{k,i}^- V_k (I - L_k^T L_k)^{1/2}$	
Estimasi Ensemble : $\hat{x}_{k,i} = \tilde{x}_{k,i} + \bar{x}_{k,i}$	

2.3.4 Metode Beda Hingga

Model yang digunakan pada algoritma EnKF dan EnKF-SR adalah model diskrit, di mana pendiskritan tersebut dilakukan dengan metode beda hingga. Beberapa skema numerik dari metode beda hingga, ditunjukkan seperti berikut. Jika $u = u(x)$, diekspansikan menurut deret Taylor, maka:

$$u(x+h) = u(x) + h \frac{\partial}{\partial x} u(x) + \frac{h^2}{2!} \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x) + \dots \quad (2.75)$$

$$u(x-h) = u(x) - h \frac{\partial}{\partial x} u(x) + \frac{h^2}{2!} \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x) - \dots \quad (2.76)$$

Beberapa skema numerik dari metode beda hingga, yaitu:

1. Beda hingga maju

Dari persamaan (2.75) diperoleh:

$$u(x+h) - u(x) = h \frac{\partial}{\partial x} u(x) + V(h)$$

$$\frac{u(x+h) - u(x)}{h} \approx \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.77)$$

persamaan (2.77) disebut persamaan beda hingga maju. Jika menggunakan notasi beda hingga dengan $u = (x = ih)$ persamaan (2.77) menjadi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x} \quad (2.78)$$

2. Beda hingga mundur

Dari persamaan (2.74) diperoleh:

$$u(x-h) - u(x) = h \frac{\partial}{\partial x} u(x) + V(h)$$
$$\frac{u(x-h) - u(x)}{h} \approx \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.79)$$

persamaan (2.79) disebut persamaan beda hingga mundur. Jika notasi beda hingga dengan $u = (x = ih)$ pada persamaan (2.79) digunakan, maka akan menjadi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} \quad (2.80)$$

3. Beda hingga pusat

Jika persamaan (2.75) dikurangi dengan persamaan (2.76), maka diperoleh:

$$u(x+h) - u(x-h) = 2h \frac{\partial}{\partial x} u(x) + \dots$$
$$u(x+h) - u(x-h) = 2h \frac{\partial}{\partial x} u(x) + V(h)$$
$$\frac{u(x+h) - u(x-h)}{2h} \approx \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.81)$$

persamaan (2.81) disebut persamaan beda hingga tengah untuk turunan parsial pertama. Jika menggunakan notasi beda hingga dengan $u = (x = ih)$ persamaan (2.81) menjadi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta x} \quad (2.82)$$

2.4 SISTEM PENGENDALIAN

Sistem pengendalian adalah suatu sistem yang bekerja dalam proses pengaturan atau pengendalian pada suatu atau beberapa besaran (variabel dan parameter), sehingga berada pada suatu nilai atau dalam suatu interval nilai (*range*) tertentu (Pakpahan, 1987). Secara umum, suatu sistem pengendalian dapat dikelompokkan sebagai berikut:

Berdasarkan jenis operatornya. sistem pengendalian dibagi menjadi dua, yaitu manual dan otomatis.

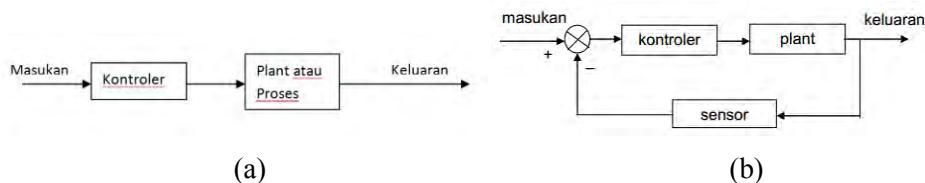
- Pengendalian secara manual adalah pengendalian yang dilakukan oleh manusia yang bertindak sebagai operator.
- Pengendalian otomatis adalah pengendalian yang dilakukan oleh komputer, mesin, atau peralatan yang bekerja secara otomatis dan operasinya di bawah pengawasan manusia.

Pengendalian suatu sistem kendali gerak AUV termasuk pengendalian otomatis karena menggunakan peralatan yang bekerja secara otomatis.

Berdasarkan jaringannya. Sistem pengendalian dibagi dua yaitu jaringan loop terbuka dan loop tertutup.

- Sistem loop terbuka adalah sistem pengendalian di mana keluaran tidak memberikan efek terhadap besaran masukan, sehingga variabel yang dikendalikan tidak dapat dibandingkan terhadap nilai yang diinginkan.
- Sistem loop tertutup adalah sistem pengendalian di mana besaran keluaran memberikan efek terhadap besaran masukan, sehingga besaran yang dikendalikan dapat dibandingkan dengan nilai yang diinginkan (*reference point*). Sistem loop tertutup juga disebut sebagai sistem *feedback control*.

Dalam Gambar 2.2 ditunjukkan diagram blok umum dari sistem loop terbuka dan loop tertutup.



Gambar 2.2. Diagram blok sederhana: (a) loop terbuka dan (b) loop tertutup

Salah satu tujuan dari penggunaan sistem pengendali pada suatu *plant* adalah untuk memperoleh suatu sistem yang stabil. Ada beberapa metode yang umum digunakan untuk menentukan atau menguji kestabilan suatu sistem. Pada sistem linier dapat dilakukan dengan beberapa metode, antara lain dengan menggunakan kriteria Root Locus, diagram Bode, Nyquist dan Lyapunov. Pada suatu sistem non-linier dan linier umumnya digunakan metode Lyapunov atau dengan melihat analisa kestabilan berdasarkan *time response*.

Semua ketidakpastian pada suatu sistem adalah merupakan gangguan bagi sistem. Gangguan adalah suatu sinyal yang cenderung mempunyai pengaruh yang merugikan pada harga keluaran sistem. Jika suatu gangguan dibangkitkan dari dalam sistem, maka disebut gangguan internal, di antaranya adalah ketidakpastian model atau parameter pada sistem. Sedangkan gangguan eksternal dibangkitkan dari luar sistem dan merupakan suatu masukan atau sinyal tambahan bagi sistem (Pakpahan, 1987).

Untuk mengetahui performansi suatu sistem pengendali tidak hanya dilakukan dengan mengamati kestabilannya, melainkan juga dilihat dari beberapa unsur lain, yang umumnya disebut karakteristik respon transien. Respon transien adalah respon sistem yang berlangsung dari keadaan awal sampai keadaan akhir (Ogata, 2010), yang terdiri dari:

1. Waktu tunda (*delay time*), t_d : waktu yang diperlukan respon untuk mencapai setengah harga akhir yang pertama kali.
2. Waktu naik (*rise time*), t_r : waktu yang diperlukan respon untuk naik dari 10 sampai 90%, 5 sampai 95%, atau 0 sampai 100% dari harga akhirnya. Untuk sistem orde dua dengan karakteristik redaman kurang, biasanya digunakan waktu naik 0 – 100%. Untuk sistem dengan karakteristik redaman lebih, biasanya digunakan waktu naik 10 – 90%.
3. Waktu puncak (*peak time*), t_p : waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali.
4. Lewatan maksimum (*maximum overshoot*), M_p : harga puncak maksimum dari kurva respon yang diukur dari satu. Jika harga keadaan tunak respon tidak sama dengan satu, maka biasa digunakan persen lewatan maksimum. Parameter ini didefinisikan sebagai:

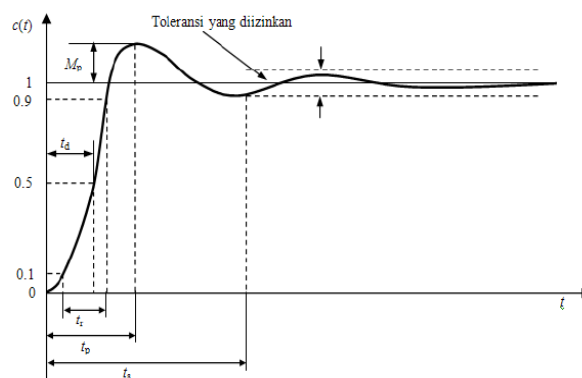
$$\text{persen lewatan maksimum} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

Besarnya lewatan maksimum ini secara langsung menunjukkan kestabilan relatif sistem.

5. Waktu penetapan (*settling time*), t_s : waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai dan menetap dalam daerah di sekitar harga akhir yang ukurannya ditentukan dengan persentase mutlak dari harga akhir (bia-

sanya 2% atau 5%). Waktu penetapan ini dikaitkan dengan konstanta waktu terbesar dari sistem kontrol. Kriteria persentase kesalahan yang akan digunakan ditentukan dari sasaran disain sistem yang dikembangkan.

Gambar 2.3 menunjukkan unsur-unsur yang umumnya terdapat pada respon transien suatu sistem, dari keadaan awal hingga keadaan akhir. Unsur-unsur suatu respon transien dapat digunakan untuk melihat kestabilan maupun performansi suatu sistem.



Gambar 2.3. Spesifikasi respon transien (Ogata, 2010)

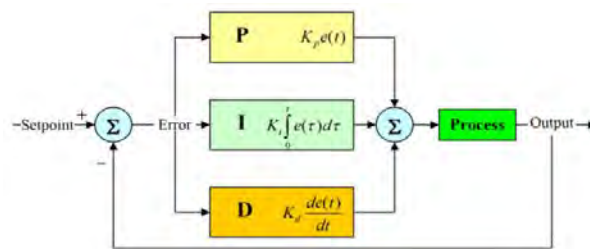
2.4.1 Kendali Proportional-Integral-Derivative (PID)

Penggunaan kendali atau kontroler PID pada sistem pengendalian proses sangatlah banyak dilakukan. Hal ini dikarenakan kontroler PID mempunyai struktur yang relatif lebih sederhana dan performansinya cukup baik. Metode yang digunakan untuk simulasi PID secara *offline* adalah metode *Ziegler-Nichols* dan *Trial and Error*. Kendali PID merupakan gabungan antara tiga macam kendali, yakni proporsional, integral dan derivatif. Adanya penggabungan kendali dapat menutupi kekurangan dan menonjolkan kelebihan masing-masing pengendalian.

Sebagai contoh kendali P (proporsional) memiliki fungsi mempercepat *rise time* agar respon dari sistem lebih cepat mencapai titik referensi, namun pengendali ini masih memiliki kekurangan, yaitu meninggalkan offset. Kelemahan ini dapat diatasi dengan menggabungkannya dengan kendali integral yang dapat menghilangkan offset dan juga mengurangi terjadinya *overshoot* yang

terlalu luas, serta mampu menghilangkan *steady state error*. Akan tetapi, kendali integral dapat menyebabkan respon sistem menjadi lambat. Penanggulan respon sistem yang lambat dilakukan dengan menggunakan kendali derivatif.

Karakteristik kontroler PID sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar dari ketiga parameter P, I dan D, seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.4. Penyetelan konstanta K_p , K_i , dan K_d akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing-masing elemen. Satu atau dua dari ketiga konstanta tersebut dapat disetel lebih menonjol dibanding yang lain. Konstanta yang menonjol itulah akan memberikan kontribusi pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan.



Gambar 2.4. Blok diagram controller PID

Konstanta K_p , K_i , dan K_d harus diatur kembali untuk mendapatkan performansi yang lebih baik lagi. Dalam mengendalikan kontroler PID diperlukan ketelitian dan keuletan, untuk menemukan nilai yang optimal.

2.4.2 Sliding Mode Control (SMC)

Sliding Mode Control (SMC) merupakan salah satu metode pengendalian sistem melalui aplikasi dari kendali pensaklaran (*switching*) berfrekuensi tinggi. Metode ini memiliki konsep pengendalian berdasar atas pemodelan yang tidak harus tepat, melainkan hanya pada estimasi yang terbatas. Oleh karena itu metode ini cukup tangguh untuk menangani adanya ketidakpastian dalam sistem (Herlambang, 2010).

a. Fungsi *Switching*

Suatu sistem dinamis dari suatu pemodelan matematis dapat dituliskan dalam bentuk:

$$\dot{x}^{(n)}(t) = f(x, t) + b(x, t)u + d(t) \quad (2.83)$$

di mana u control input, x merupakan vektor keadaan, $f(x, t)$ dan $b(x, t)$ berupa fungsi terbatas, $d(t)$ gangguan eksternal. Jika x_d merupakan x yang diinginkan, maka *tracking error*-nya dapat dinyatakan dengan $e(t) = x(t) - x_d(t)$. Fungsi *switching* adalah permukaan $S(x, t)$ di dalam ruang keadaan R^n , yang memenuhi persamaan (Perruquetti dan Barbot, 2002):

$$S(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e \quad (2.84)$$

dengan λ berupa konstanta positif. Di mana fungsi *switching* ini digunakan untuk menentukan besarnya nilai u agar memenuhi kondisi *sliding*.

b. Permukaan *Sliding*

Fungsi *switching* disebut dengan permukaan *sliding* (*sliding surface*) jika memenuhi:

$$S(x, t) = 0 \quad (2.85)$$

Permukaan *sliding* berupa garis yang merupakan komponen penting dari SMC sebagai tempat trayektori keadaan meluncur dari kondisi awal (*initial condition*) menuju keadaan yang diinginkan (*reference point*). Untuk sistem berorde-2 ($n = 2$), permukaan *sliding* dapat ditulis:

$$S(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{2-1} e = \frac{de}{dt} + \lambda e$$

atau $S(x, t) = \dot{e} + \lambda e = 0 \quad (2.86)$

Persamaan (2.86) menunjukkan suatu garis lurus pada bidang $e\dot{e}$. Permukaan *sliding* ini membagi bidang menjadi dua bagian, yaitu $S > 0$ dan $S < 0$. Agar trayektori keadaan dapat meluncur, maka sistem harus berada dalam kondisi *sliding*. Dengan demikian, besar nilai *control input* bergantung pada nilai $S(x, t)$.

c. Kondisi *Sliding*

Perancangan *control law* pada SMC dilakukan sedemikian rupa sehingga $e(t)$ bergerak menuju permukaan *sliding* dan meluncur pada permukaan tersebut untuk semua $t \geq 0$. Untuk memperoleh *control law* digunakan suatu fungsi yang mirip fungsi Lyapunov, di mana fungsi yang dikonstruksi merupakan fungsi definit positif, yaitu:

$$v = \frac{1}{2} s^2 \quad (2.87)$$

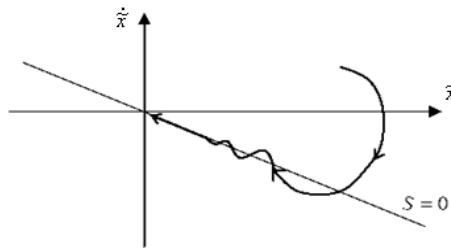
dengan $V(0)=0$ dan $V > 0$ untuk $S \neq 0$. Kondisi yang memenuhi syarat kestabilan sistem merupakan turunan pertama dari persamaan (2.87) yang bersifat definit negatif, yaitu:

$$\dot{V} = S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (2.88)$$

Pertidaksamaan (2.88) disebut kondisi *sliding*. Kondisi tersebut dapat ditulis dalam beberapa bentuk, yaitu :

$$S\dot{S} < 0 \text{ atau } \dot{S} \text{sgn}(S) \leq -\eta \quad (2.89)$$

dengan suatu η konstanta positif. Gambar 2.5 menginterpretasikan ilustrasi kondisi *sliding* dari metode pengendalian SMC, di mana trayektori keadaan bergerak meluncur pada garis lurus $S=0$ yang merupakan permukaan *sliding*. *Sliding mode* berarti bahwa sekali trayektori keadaan e mencapai permukaan *sliding*, maka trayektori sistem akan bertahan di sana sambil meluncur ke titik asal bidang $e\dot{e}$ secara independen dengan semua ketidakpastian.



Gambar 2.5. Kondisi *sliding* (Perruquetti dan Barbot, 2002)

Mengacu pada formulasi yang diajukan sebagaimana di atas, maka perancangan suatu pengendali SMC dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Menentukan fungsi *Switching* $S(x,t)$ seperti pada persamaan (2.86) dari *tracking error* sistem dinamik.

2. Menentukan permukaan *Sliding*, yaitu $S(x,t)=0$ dari fungsi *Switching* yang telah diperoleh.
3. Menentukan nilai estimasi pengendali \hat{u} . Dinamika saat dalam kondisi *sliding* dapat dituliskan sebagai:

$$\dot{S} = 0 \quad (2.90)$$

dengan menyelesaikan persamaan (2.86) diperoleh ekspresi untuk nilai estimasi pengendali \hat{u} sebagai kontrol ekivalen. Pada waktu menggunakan SMC dinamis pada saat $\dot{S} = 0$ ditemukan \hat{u}

4. Mendefinisikan aturan SMC, yaitu penggunaan *control law*,

$$u = \hat{u} - K \operatorname{sgn}(S) \quad (2.91)$$

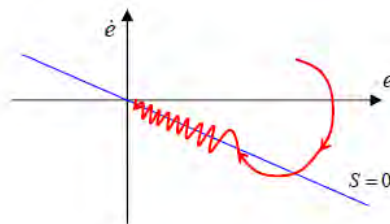
di mana fungsi signum, sgn , pada persamaan (2.89) didefinisikan sebagai:

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & , x < 0 \\ 1 & , x \geq 0 \end{cases} \quad (2.92)$$

5. Substitusi nilai \hat{u} pada *control law* sehingga diperoleh *control input* baru sebagai pengganti *control input* sebelumnya.
6. Menentukan nilai K yang sesuai dengan kondisi *sliding* pada persamaan (2.91).

d. Sliding Mode Control Dengan *Boundary Layer* (BL)

Munculnya *chattering* merupakan salah satu kekurangan metode SMC. *Chattering* merupakan osilasi keluaran pengendali dengan frekuensi tinggi yang disebabkan oleh *switching* yang sangat cepat untuk membentuk *sliding mode*. Hal ini dapat menyebabkan ketidakstabilan pada sistem.



Gambar 2.6. Kondisi *chattering* (Perruquetti dan Barbot, 2002)

Gambar 2.6 menginterpretasikan *chattering*, yang menyebabkan trayektori keadaan sistem berupa osilasi dan tidak menuju ke titik asal bidang $e\dot{e}$. Untuk mencegah ketidakstabilan akibat *chattering*, pada SMC diterapkan satu *boundary layer* (BL) pada permukaan *sliding*, yang akan membuat *smooth* dinamika *control input* u dan menyakinkan bahwa sistem berada di dalam *layer*. Lebar dari BL dinyatakan sebagai 2ϕ . Bila diambil $|S|$ sebagai jarak antara keadaan e dan garis *sliding* $S = 0$, maka vektor keadaan e berada di dalam BL jika $|S| \leq \phi$, dan berada di luar jika $|S| > \phi$.

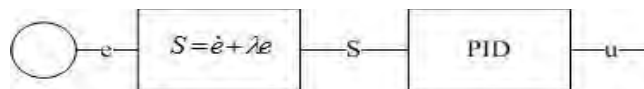
Penggunaan BL di dalam *control law* pada $u = \hat{u} - K \text{sgn}(S)$ dilakukan dengan mengganti fungsi $\text{sgn}(S)$ dengan $\text{sat}\left(\frac{S}{\phi}\right)$ dan K adalah konstanta positif, di mana fungsi saturasi, *sat*, didefinisikan sebagai:

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} x & \text{jika } |x| \leq 1 \\ \text{sgn}(x) & \text{jika } |x| \geq 1 \end{cases} \quad (2.93)$$

Kondisi *sliding* pada SMC menggunakan BL adalah keadaan di mana trayektori keadaan sistem bergerak dan berosilasi di sekitar permukaan *sliding* dalam *boundary layer*. Konsep *boundary layer* ini dapat mereduksi besarnya lebar osilasi pada *chattering*, sehingga sistem tetap stabil. Nilai ϕ adalah merupakan lebar dari *boundary layer*, sedangkan ε menyatakan ketebalan dari *boundary layer*.

2.4.3 Sliding-PID

Perancangan sistem kendali Sliding-PID merupakan gabungan antara SMC dan PID. Dalam penelitian ini sistem dirancang untuk terlebih dahulu melewati SMC kemudian dioptimasi oleh PID controller, seperti diilustrasikan pada blok diagram dalam Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Blok diagram SPID

2.5 KETERKONTROLAN DAN KETERAMATAN

Sebelum dilakukan pengendalian terhadap sistem, terlebih dahulu dikaji karakteristik pada model linier 6-DOF melalui matriks keterkontrolan dan keteramatannya. Sifat keterkontrolan dan keteramatan dari model linier 6-DOF dapat diketahui, sehingga dapat diberikan sistem kendali dan navigasi. Berikut cara adalah cara untuk mengetahui keterkontrolan dan keteramatan.

2.5.1 Keterkontrolan

Model linier yang merupakan hasil linierisasi, berupa persamaan *state space* dikatakan terkontrol bila untuk setiap keadaan sembarang $x(0) = x_0$ ada masukan $u(t)$ yang tidak dibatasi, mentransfer keadaan x_0 ke sembarang keadaan akhir $x(t_1) = x_1$ dengan waktu akhir t_1 hingga (Subiono, 2010).

Pada suatu sistem dapat diperoleh matriks *Controllable*, dengan persamaan:

$$Controlable = (\mathbf{B}|\mathbf{AB}|\mathbf{A}^2\mathbf{B}|\dots|\mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}) \quad (2.94)$$

Di mana n adalah ordo matriks A . Suatu sistem dikatakan terkontrol jika dan hanya jika sistem memiliki jumlah *rank* atau derajat kestabilan dari *Controllable* yang sama dengan jumlah ordo dari matriks A .

2.5.2 Keteramatan

Pengertian dari keteramatan adalah, bila suatu sistem mempunyai keadaan awal $x(0) = x_0$ tertentu, maka dapat diamati bahwa dari setiap pengukuran akan dihasilkan keluaran sistem linier yang merupakan hasil linierisasi dari waktu $t = 0$ ke $t = t_1$. Sehingga dapat dikatakan bahwa sistem yang teramati itu adalah sistem yang akan memungkinkan untuk memperbaiki kondisi awal melalui output. Suatu sistem yang teramati dapat diidentifikasi menggunakan matriks *Observable*, dengan persamaan:

$$Observable = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{(n-1)} \end{pmatrix} \quad (2.95)$$

dengan n adalah ordo matriks A . Suatu sistem dikatakan teramati jika dan hanya jika sistem memiliki jumlah *rank observable* sama dengan jumlah ordo dari matriks A .

2.6 ANALISA KESTABILAN LYAPUNOV

Hal yang penting diperhatikan pada suatu sistem kendali adalah ketepatan analisa kestabilan sistem kendali tersebut. Metode analisa kestabilan untuk sistem kendali yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah metode kestabilan Lyapunov. Berikut definisi beserta teorema yang terkait dengan fungsi Lyapunov beserta jenis kestabilannya, seperti dijelaskan oleh Slotine dan Li (1991).

Definisi: Fungsi $V(x)$ dikatakan sebagai fungsi Lyapunov jika pada sebuah bola B_R , $V(x)$ adalah definit positif dan memiliki turunan parsial semi definit negatif $\dot{V}(x) \leq 0$.

Teorema 1: Jika pada bola B_R , terdapat fungsi skalar $V(x)$ yang turunan parsial pertamanya kontinu di mana:

1. $V(x)$ adalah definit positif (lokal pada B_R)
2. $\dot{V}(x)$ semi definit negatif (lokal pada B_R)

Maka titik kesetimbangan sistem tersebut adalah stabil, dengan kestabilan asimtotik.

Teorema 2: Jika pada bola B_R , terdapat fungsi skalar $V(x)$ yang turunan parsial pertamanya kontinu di mana

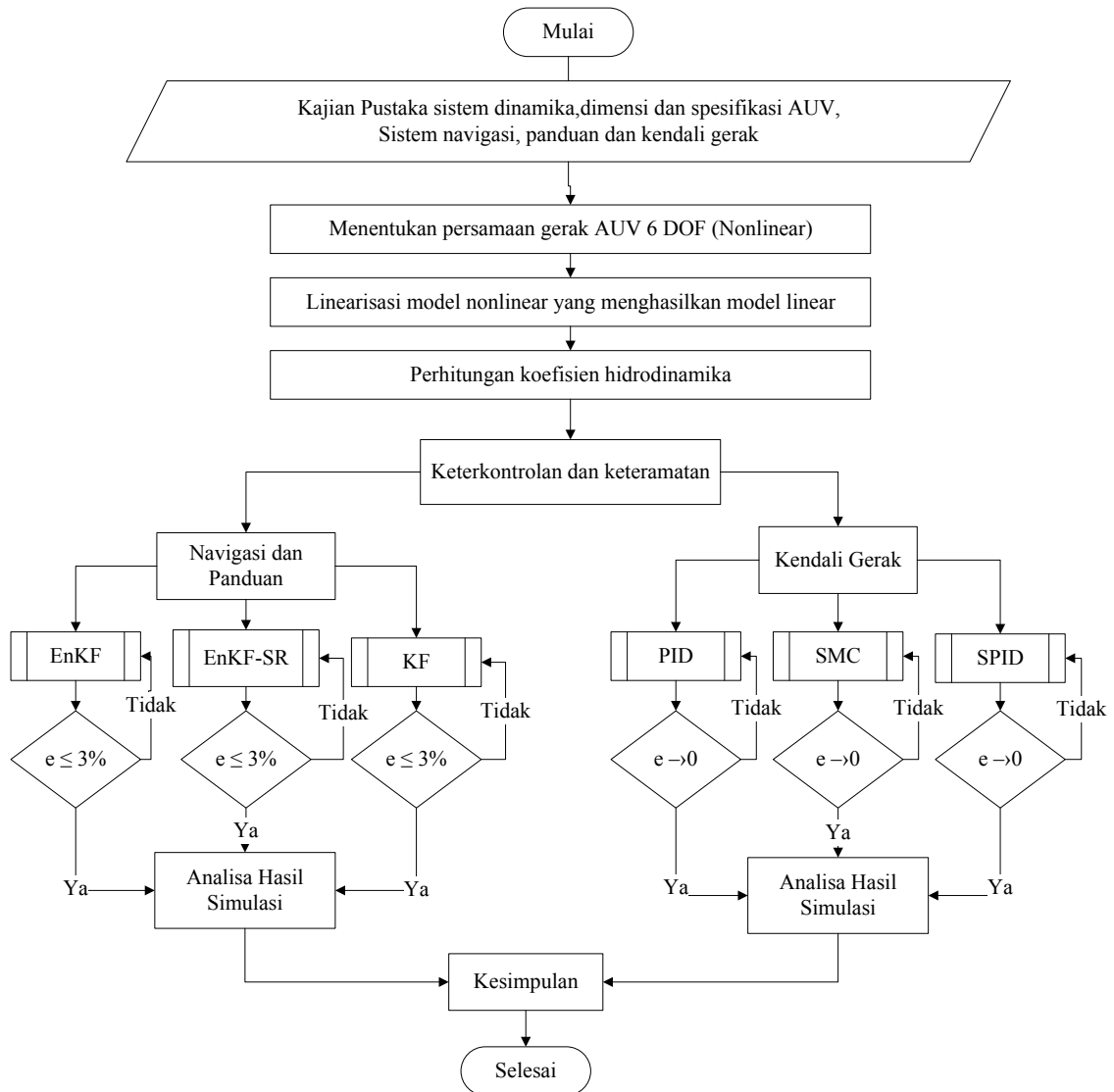
1. $V(x)$ adalah definit positif (lokal pada B_R)
2. $\dot{V}(x)$ semi definit negatif (lokal pada B_R)
3. $V(x) \rightarrow \infty$ dengan $\|x\| \rightarrow \infty$

Maka titik kesetimbangan sistem tersebut adalah stabil asimtotik global.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan bagaimana langkah-langkah yang diambil dalam melaksanakan penelitian sebagaimana dilaporkan pada disertasi ini, yang diilustrasikan dalam Gambar 3.1. Selain itu, dijelaskan juga prosedur dan proses pelaksanaan tiap-tiap langkah yang dilakukan dalam menyelesaikan penelitian.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

3.1 TAHAP PENELITIAN

a. Tahap awal (studi pustaka)

Pada tahap ini diawali dengan mengkaji sistem dinamika, pemodelan, dimensi dan spesifikasi AUV. Berikutnya mengkaji dasar teori linierisasi model non-linier, sistem navigasi dan panduan dengan metode Ensemble Kalman Filter (EnKF) dan Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR), dasar teori sistem kendali gerak dengan metode Proportional Integral Derivative (PID), *Sliding Mode Control* (SMC) dan Sliding PID (SPID) serta dasar teori analisa kestabilan Lyapunov.

b. Mengkaji persamaan non-linier 6-DOF AUV

Pada tahap ini mengkaji pemodelan non-linier 6-DOF yang terdiri dari gerakan translasi (surge, sway, heave) dan gerakan rotasi (roll, pitch dan yaw). Persamaan gerak AUV 6-DOF pada dasarnya adalah gaya aksi dan reaksi dengan menggunakan hukum Newton II, di mana gaya yang ditimbulkan dari internal AUV dipengaruhi oleh massa dan percepatan. Sedangkan gaya eksternal ditimbulkan karena faktor gaya hidrodinamika dari AUV baik itu *resistance*, *drag*, *added mass*, *thrust* dan *lift*.

c. Linierisasi model non-linier 6-DOF

Pada tahap ini dilakukan proses linierisasi dengan matriks Jacobi. Model linier yang didapatkan ini digunakan sebagai platform untuk sistem navigasi panduan dan kendali gerak.

d. Komputasi koefisien hidrodinamika

Pada tahap ini dilakukan komputasi koefisien hidrodinamika, yaitu massa tambah, gaya hambatan, gaya angkat. Komputasi koefisien hidrodinamika secara numerik dengan menggunakan dimensi dari AUV yang dibagi menjadi tiga bagian yaitu *nose*, *middle* dan *tail*.

e. Menguji karakteristik dari model linier 6-DOF

Pada tahap ini dilakukan pengujian karakteristik dari sistem dengan uji keterkontrolan dan keteramatan. Jika terbukti terkontrol, maka akan dilakukan

kendali terhadap sistem. Uji keteramatan dilakukan untuk mengetahui apakah sistem dapat diamati. Ketika sistem teramati, artinya setiap perubahan sistem dapat diamati atau diukur.

f. Simulasi sistem navigasi dan panduan

Pada tahap ini dilakukan simulasi sistem navigasi dan panduan dengan tiga metode yaitu EnKF, EnKF-SR dan KF pada sepuluh bentuk lintasan dengan software Matlab pada Laptop ASUS dengan spesifikasi core i3 dan RAM 2Gb.. sehingga didapatkan akurasi yang baik dengan nilai RMSE yang kecil pada masing-masing metode. ketiga metode tersebut dibandingkan tingkat akurasi yang dihasilkan.

g. Analisa hasil simulasi sistem navigasi dan panduan

Pada tahap ini dilakukan analisa hasil simulasi dari tiga metode tersebut, selanjutnya akan dibandingkan tingkat akurasi melalui nilai RMSE yang dihasilkan pada masing-masing lintasan.

h. Mencari persamaan kendali

Pada tahap ini dilakukan komputasi persamaan sistem kendali yang akan menjadi input pada masing-masing *degree of freedom*. Setelah didapatkan persamaan kendali kemudian disimulasikan dengan model linier 6-DOF.

i. Simulasi sistem kendali gerak

Pada tahap ini dilakukan simulasi sistem kendali PID, SMC dan SPID dengan simulink software Matlab pada Laptop ASUS dengan spesifikasi core i3 dan RAM 2Gb. Dimana PID dibagi jadi dua tipe yaitu PID default dengan nilai proportional (K_p), integral (K_i) dan derivative (K_d) yang didapat dari *trial and error* dan yang kedua PID identik dengan nilai K_p, K_i dan K_d dari nilai SPID.

j. Analisa hasil simulasi sistem kendali gerak

Pada tahap ini dilakukan analisa hasil simulasi sistem kendali dengan PID default, PID identik, SMC dan SPID baik *error*, *settling time*, *delay time*, *maximum overshoot*.

k. Analisa kestabilan

Pada tahap ini dilakukan analisa kestabilan dengan metode Lyapunov, dimana sistem kendali PID, SMC dan SPID dianalisa kestabilan sistem persamaan kendalinya dengan fungsi kandidat Lyapunov sehingga didapatkan sifat kestabilannya stabil asimtotik lokal atau stabil asimtotik global.

l. Penarikan kesimpulan dan saran.

Pada tahap ini dilakukan penarikan kesimpulan dari hasil analisa sistem navigasi, panduan dan kendali gerak AUV pada model linier sehingga bisa menjawab tujuan penelitian dan memberikan solusi dari rumusan masalah serta saran untuk peneliti yang lain dalam pengembangan sitem navigasi, panduan dan Kendali gerak AUV.

Berikut, dalam Tabel 3.1 dan Gambar 3.2, ditampilkan spesifikasi teknis dan profil *Segorogeni* AUV.

Tabel 3.1. Spesifikasi dari *Segorogeni* AUV

Berat	15 Kg
Overall Length	980 mm
Beam	180 mm
Controller	Ardupilot Mega 2.0
Communication	Wireless Xbee 2.4 GHz
Camera	TTL Camera
Battery	Li-Pro 11,8 V
Propulsion	12V motor DC
Propeller	3 Blades OD : 40 mm
Speed	1,94 knots (1m/s)
Operation Depth	6 m



Gambar 3.2. Profil *Segorogeni* AUV

3.2 TAHAP PENELITIAN SISTEM NAVIGASI DAN PANDUAN

- a. Tahap awal (penentuan model non-linier 6-DOF dan proses linierisasi)

Pada tahap ini diawali dengan menentukan model non-linier 6-DOF kemudian dilakukan proses linierisasi sehingga dihasilkan model linier. Selanjutnya perhitungan koefisien hidrodinamika sebagai input nilai koefisien hidrodinamika pada model 6-DOF dalam algoritma sistem navigasi dan panduan, seperti dalam Gambar 3.3.

- b. Menerapkan metode EnKF, EnKF-SR dan KF

Pada tahap ini diawali dengan mendiskritkan model linier dengan metode beda hingga maju. Selanjutnya model diskrit tersebut sebagai model sistem dari algoritma EnKF, EnKF-SR dan KF yang sesuai pada Tabel 2.5 – 2.7. Pada ketiga metode tersebut, terdapat tiga tahap yaitu tahap inisialisasi, tahap prediksi dan tahap koreksi.

- c. Mendapatkan RMSE dan tingkat akurasi

Pada tahap ini melanjutkan tahap sebelumnya yaitu mendapatkan nilai RMSE hasil dari tahap koreksi. Nilai RMSE ini dapat dilihat akurasi posisi dan kecepatan dari masing-masing metode.

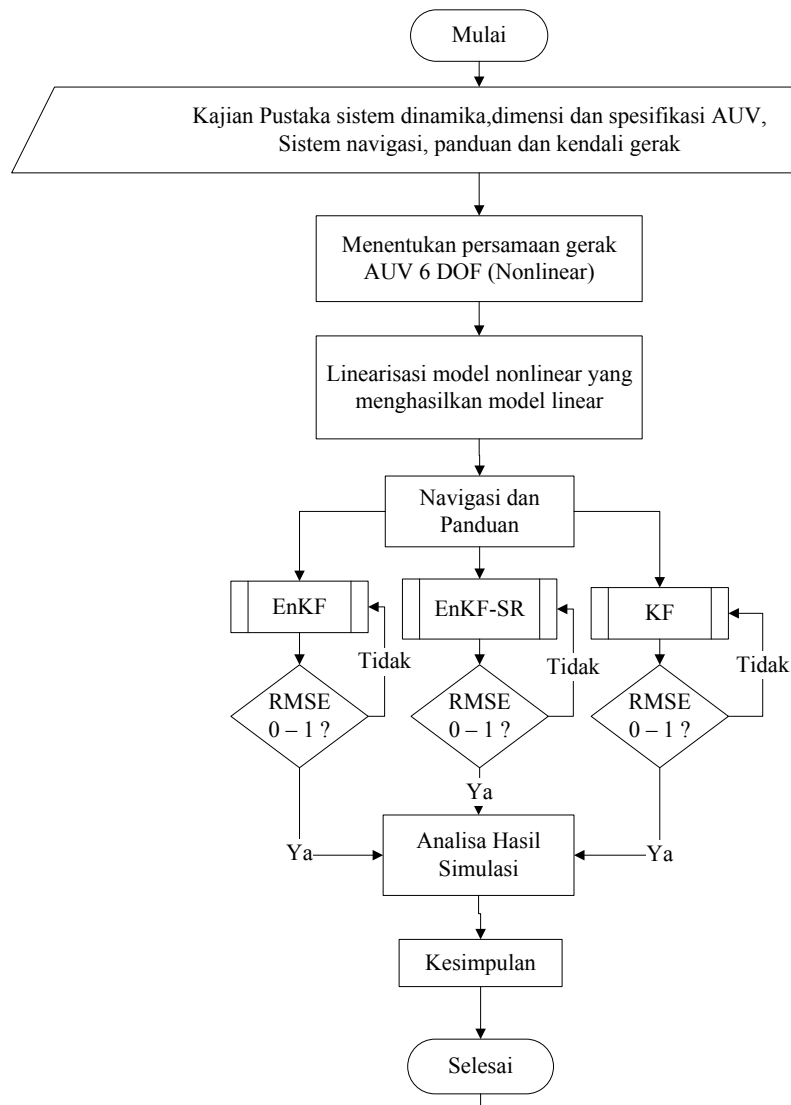
- d. Analisa hasil simulasi

Pada tahap ini hasil simulasi dibagi menjadi tiga sudut pandang yaitu

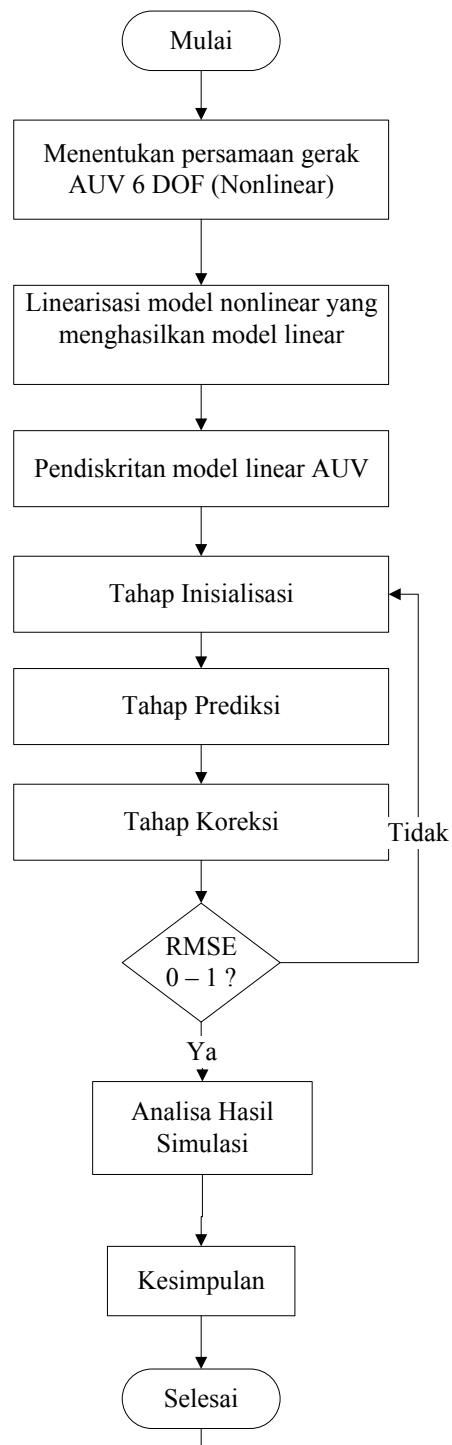
1. Perbandingan metode (jumlah ensemble dan lintasan sama)
2. Perbandingan jumlah ensemble (metode dan lintasan sama)

3. Perbandingan lintasan (metode dan jumlah lintasan sama)

Namun untuk perbandingan lintasan dengan metode dan jumlah lintasan sama tidak dibahas secara detail di analisa pembahasan, hanya dilampirkan sebagai data pendukung untuk perbandingan. Gambar 3.4 menggambarkan proses algoritma dari metode EnKF, EnKF-SR dan KF sesuai Tabel 2.5, Tabel 2.6 dan Tabel 2.7. Berikut ini adalah diagram alir untuk sistem navigasi dan panduan serta diagram alir metode EnKF.



Gambar 3.3. Diagram alir algoritma Sistem Navigasi dan Panduan



Gambar 3.4. Diagram alir Metode EnKF, EnKF-SR dan KF

3.3 TAHAP PENELITIAN SISTEM KENDALI GERAK

- a. Tahap awal (penentuan model non-linier 6-DOF dan proses linierisasi)

Pada tahap ini diawali dengan menentukan model non-linier 6-DOF kemudian dilakukan proses linierisasi sehingga dihasilkan model linier. Selanjutnya komputasi koefisien hidrodinamika sebagai input nilai koefisien hidrodinamika pada 6-DOF dalam persamaan sistem kendali.

- b. Menerapkan metode PID, SMC dan SPID

Pada tahap ini diawali dengan mencari persamaan sistem kendali PID, SMC dan SPID. Selanjutnya masing-masing sistem kendali disimulasikan dengan model linier.

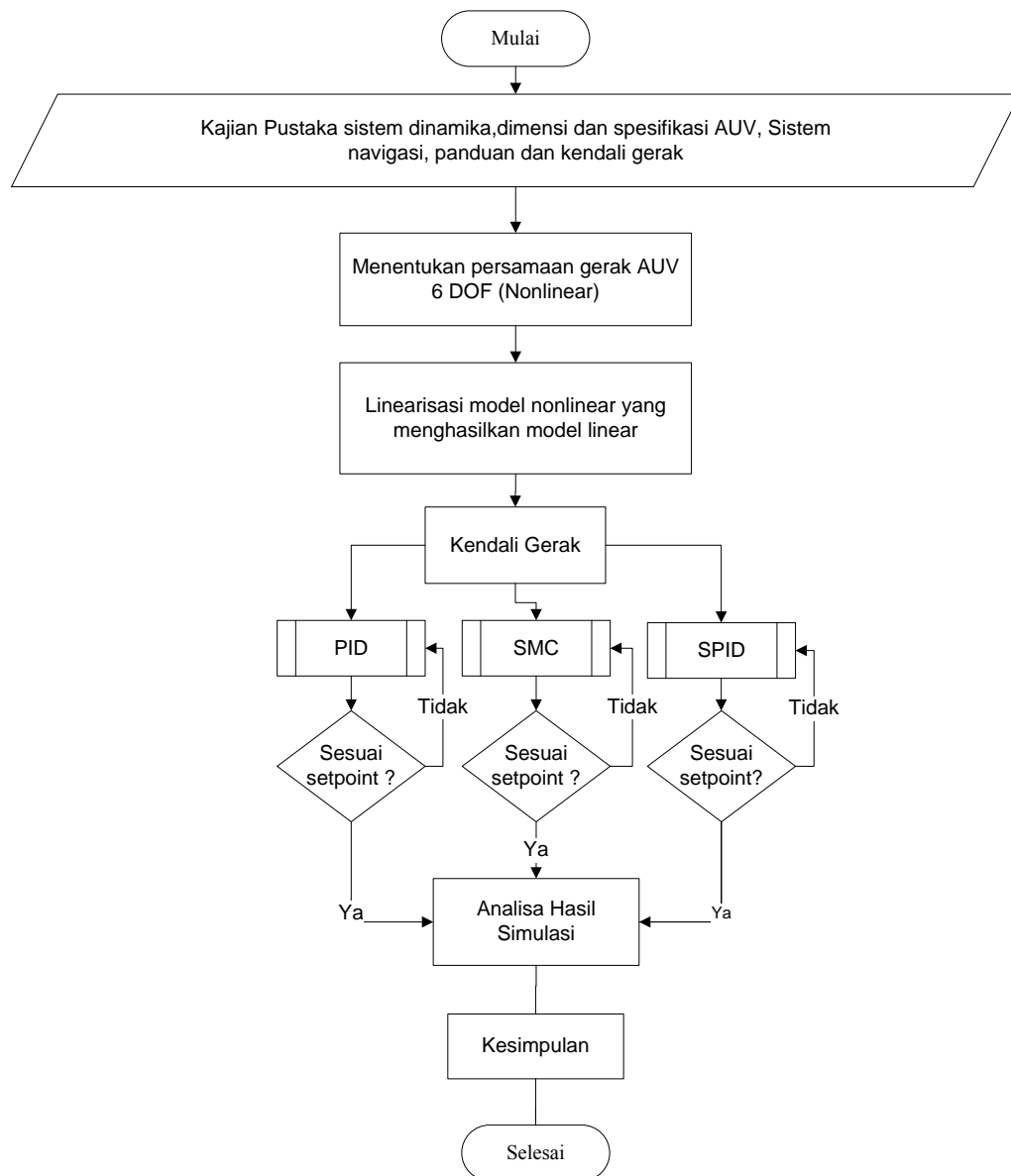
- c. Mendapatkan error dan *settling time*

Pada tahap ini merupakan analisa hasil dari penerapan sistem kendali. Hasil yang didapatkan berupa respon yang dapat dibandingkan error, *settling time*, *delay time* dan *maximum overshoot* masing-masing metode.

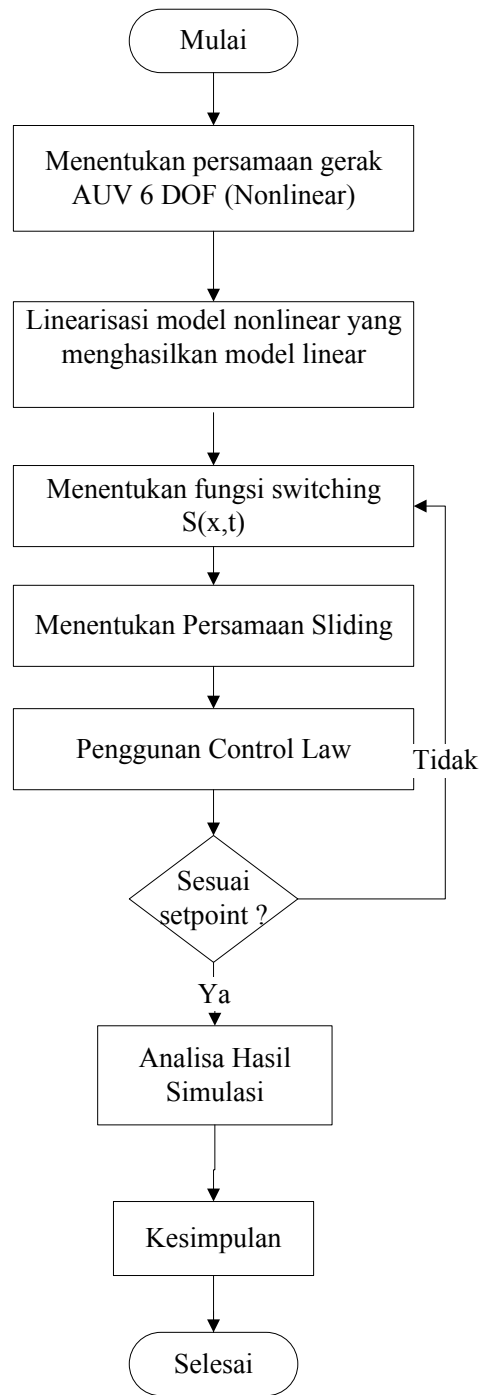
- d. Analisa kestabilan Lyapunov

Pada tahap ini dilakukan analisa kestabilan dengan metode Lyapunov, dimana sistem kendali PID, SMC dan SPID dianalisa kestabilan sistem persamaan kendalinya dengan fungsi kandidat Lyapunov sehingga didapatkan sifat kestabilannya stabil asimtotik lokal atau stabil asimtotik global.

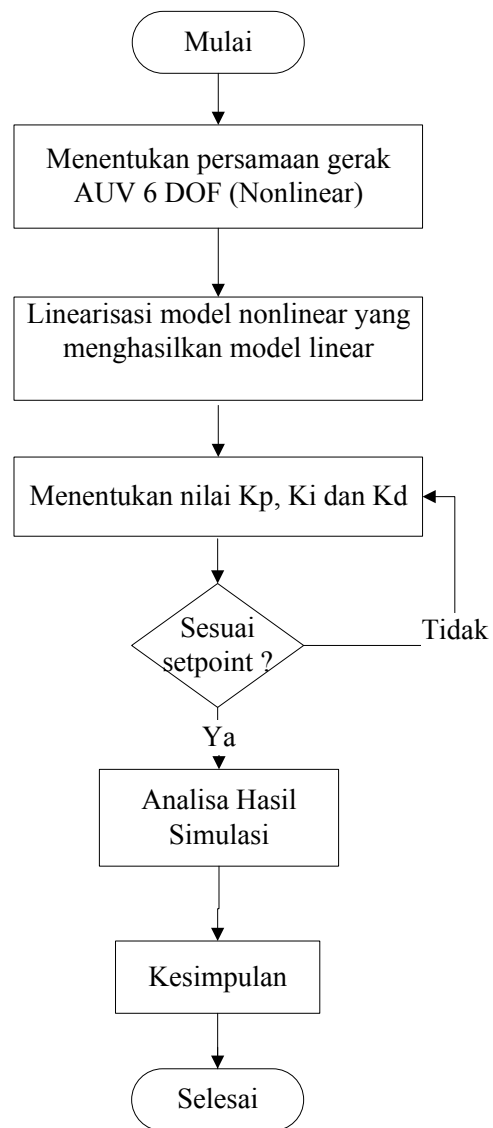
Pada Gambar 3.5 – 3.8 adalah diagram alir untuk sistem kendali gerak serta diagram alir metode SMC, PID dan SPID :



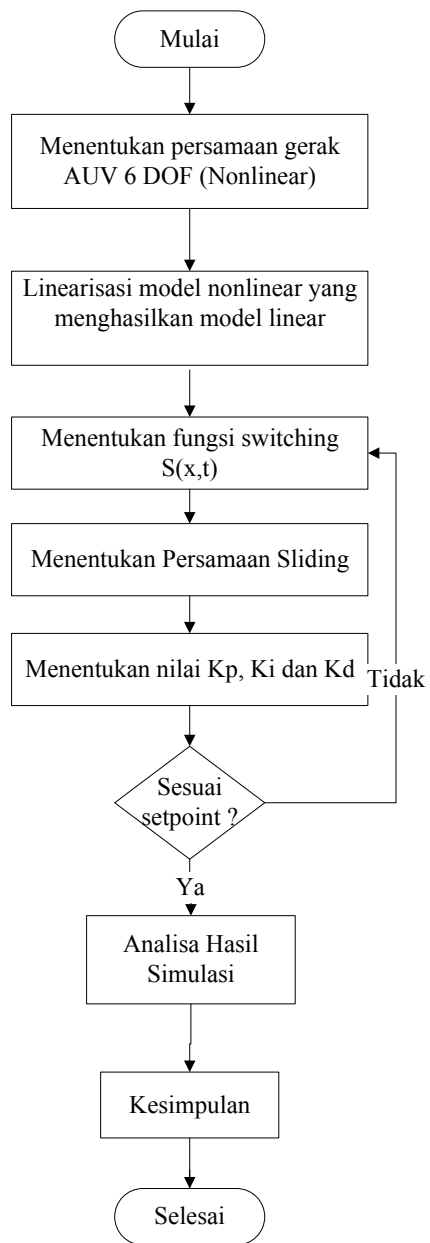
Gambar 3.5. Diagram alir Sistem Kendali Gerak



Gambar 3.6. Diagram alir Metode SMC



Gambar 3.7. Diagram alir Metode PID



Gambar 3.8. Diagram alir Metode SPID

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini dijelaskan proses linierisasi model non-linier AUV dengan matriks Jacobi, komputasi koefisien hidrodinamika, sistem navigasi dan panduan pada model linier AUV menggunakan tiga metode yaitu Kalman Filter (KF), Ensemble Kalman Filter (EnKF) dan Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR) serta terdapat sepuluh kasus dalam penentuan lintasan. Setelah pembahasan hasil simulasi pada sistem navigasi dan panduan kemudian sistem kendali gerak dengan PID, Sliding Mode Control (SMC) dan Sliding PID (SPID) pada model linier 6-DOF, berikutnya dilakukan analisa kestabilan dengan metode Lyapunov.

4.1 LINIERISASI MODEL NON-LINIER AUV

Sebelum dilakukan proses linierisasi, model linier yang terdapat pada persamaan (2.52)-(2.57) dibentuk terlebih dahulu menjadi bentuk berikut:

Surge

$$\ddot{u} + \frac{m z_G \dot{q}}{m - X_{\dot{u}}} - \frac{m y_G \dot{r}}{m - X_{\dot{u}}} = \frac{X_{res} + X_{|u|u} |u| + X_{wq} wq + X_{qq} qq + X_{vr} vr + X_{rr} rr + X_{prop} - m[-vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + pq y_G + pr z_G]}{m - X_{\dot{u}}} \quad (4.1)$$

Sway

$$\ddot{v} - \frac{m z_G \ddot{p}}{m - Y_{\dot{v}}} + \frac{(m x_G - Y_{\dot{r}}) \dot{r}}{m - Y_{\dot{v}}} = \frac{Y_{res} + Y_{|v|v} |v| + Y_{r|r} |r| + Y_{ur} ur + Y_{wp} wp + Y_{pq} pq + Y_{uv} uv + Y_{uu} \delta_r u^2 \delta_r - m[-wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + qr z_G + pq x_G]}{m - Y_{\dot{v}}} \quad (4.2)$$

Heave

$$\ddot{w} - \frac{(m x_G + Z_{\dot{q}}) \dot{q}}{m - Z_{\dot{w}}} + \frac{m y_G \ddot{p}}{m - Z_{\dot{w}}} = \frac{Z_{res} + Z_{|w|w} |w| + Z_{q|q} |q| + Z_{uq} uq + Z_{vp} vp + Z_{rp} rp + Z_{uw} uw + Z_{uu} \delta_s u^2 \delta_s - m[-uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + rp x_G + rq y_G]}{m - Z_{\dot{w}}} \quad (4.3)$$

Roll

$$\ddot{p} + \frac{m y_G \dot{w}}{I_x - K_{\dot{p}}} - \frac{m z_G \dot{v}}{I_x - K_{\dot{p}}} = \frac{K_{res} + K_{p|p} |p| + K_{prop} - ((I_z - I_y)qr + m[y_G(-uq + vp) - z_G(-wp + ur)])}{I_x - K_{\dot{p}}} \quad (4.4)$$

Pitch

$$\ddot{q} + \frac{m z_G \dot{u}}{I_y - M_{\dot{q}}} - \frac{(m x_G + M_{\dot{w}}) \dot{w}}{I_y - M_{\dot{q}}} = \frac{M_{res} + M_{w|w} |w| + M_{q|q} |q| + M_{uq} uq + M_{vp} vp + M_{rp} rp + M_{uw} uw + M_{uu} \delta_s u^2 \delta_s - ((I_x - I_z)rp + m[z_G(-vr + wq) - x_G(-uq + vp)])}{I_y - M_{\dot{q}}} \quad (4.5)$$

Yaw

$$\dot{r} + \frac{(mx_G - N_{\dot{\psi}})\dot{\psi}}{I_z - N_{\dot{r}}} - \frac{my_G\dot{u}}{I_z - N_{\dot{r}}} = \frac{N_{res} + N_{v|v|v|v|} + N_{r|r|r|r|} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu}\delta_r u^2\delta_r - ((I_y - I_z)pq + m[x_G(-wp + ur) - y_G(-vr + wq)])}{I_z - N_{\dot{r}}} \quad (4.6)$$

sehingga persamaan (4.1) – (4.6) dapat dibentuk sebagai fungsi berikut ini :

$$f_1 = \frac{X_{res} + X_{|u|u|u|u|} + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop} - m[-vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + pq y_G + pr z_G]}{m - X_{\dot{u}}} \quad (4.7)$$

$$f_2 = \frac{Y_{res} + Y_{|v|v|v|v|} + Y_{r|r|r|r|} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{uu}\delta_r u^2\delta_r - m[-wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + qr z_G + pq x_G]}{m - Y_{\dot{v}}} \quad (4.8)$$

$$f_3 = \frac{Z_{res} + Z_{|w|w|w|w|} + Z_{q|q|q|q|} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{uu}\delta_s u^2\delta_s - m[-uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + rp x_G + rq y_G]}{m - Z_{\dot{w}}} \quad (4.9)$$

$$f_4 = \frac{K_{res} + K_{p|p|p|p|} + K_{prop} - ((I_z - I_y)qr + m[y_G(-uq + vp) - z_G(-wp + ur)])}{I_x - K_{\dot{p}}} \quad (4.10)$$

$$f_5 = \frac{M_{res} + M_{w|w|w|w|} + M_{q|q|q|q|} + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uu}\delta_s u^2\delta_s - ((I_x - I_z)rp + m[z_G(-vr + wq) - x_G(-uq + vp)])}{I_y - M_{\dot{q}}} \quad (4.11)$$

$$f_6 = \frac{N_{res} + N_{v|v|v|v|} + N_{r|r|r|r|} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu}\delta_r u^2\delta_r - ((I_y - I_z)pq + m[x_G(-wp + ur) - y_G(-vr + wq)])}{I_z - N_{\dot{r}}} \quad (4.12)$$

sehingga

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{mz_G}{m - X_{\dot{u}}} & \frac{-my_G}{m - X_{\dot{u}}} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{mz_G}{m - Y_{\dot{v}}} & 0 & \frac{(mx_G - Y_{\dot{r}})}{m - Y_{\dot{v}}} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{my_G}{m - Z_{\dot{w}}} & -\frac{(mx_G + Z_{\dot{q}})}{m - Z_{\dot{w}}} & 0 \\ 0 & -\frac{mz_G}{I_x - K_{\dot{p}}} & \frac{my_G}{I_x - K_{\dot{p}}} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{mz_G}{I_y - M_{\dot{q}}} & 0 & -\frac{(mx_G + M_{\dot{w}})}{I_y - M_{\dot{q}}} & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{my_G}{I_z - N_{\dot{r}}} & \frac{(mx_G - N_{\dot{\psi}})}{I_z - N_{\dot{r}}} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Sedangkan model linier didapatkan sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = A x(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (4.14)$$

dengan

$$A = J_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{mz_G}{m-X_{\ddot{u}}} & \frac{-my_G}{m-X_{\ddot{u}}} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{mz_G}{m-Y_{\ddot{v}}} & 0 & \frac{(mx_G-Y_{\ddot{v}})}{m-Y_{\ddot{v}}} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{my_G}{m-Z_{\ddot{w}}} & -\frac{(mx_G+Z_{\ddot{q}})}{m-Z_{\ddot{w}}} & 0 \\ 0 & -\frac{mz_G}{I_x-K_{\ddot{p}}} & \frac{my_G}{I_x-K_{\ddot{p}}} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{mz_G}{I_y-M_{\ddot{q}}} & 0 & -\frac{(mx_G+M_{\ddot{w}})}{I_y-M_{\ddot{q}}} & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{my_G}{I_z-N_{\ddot{r}}} & \frac{(mx_G-N_{\ddot{v}})}{I_z-N_{\ddot{r}}} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 & e_1 & g_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 & e_2 & g_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 & e_3 & g_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 & e_4 & g_4 \\ a_5 & b_5 & c_5 & d_5 & e_5 & g_5 \\ a_6 & b_6 & c_6 & d_6 & e_6 & g_6 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$B = J_u = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{mz_G}{m-X_{\ddot{u}}} & \frac{-my_G}{m-X_{\ddot{u}}} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{mz_G}{m-Y_{\ddot{v}}} & 0 & \frac{(mx_G-Y_{\ddot{v}})}{m-Y_{\ddot{v}}} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{my_G}{m-Z_{\ddot{w}}} & -\frac{(mx_G+Z_{\ddot{q}})}{m-Z_{\ddot{w}}} & 0 \\ 0 & -\frac{mz_G}{I_x-K_{\ddot{p}}} & \frac{my_G}{I_x-K_{\ddot{p}}} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{mz_G}{I_y-M_{\ddot{q}}} & 0 & -\frac{(mx_G+M_{\ddot{w}})}{I_y-M_{\ddot{q}}} & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{my_G}{I_z-N_{\ddot{r}}} & \frac{(mx_G-N_{\ddot{v}})}{I_z-N_{\ddot{r}}} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 & E_1 & G_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 & E_2 & G_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 & D_3 & E_3 & G_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 & D_4 & E_4 & G_4 \\ A_5 & B_5 & C_5 & D_5 & E_5 & G_5 \\ A_6 & B_6 & C_6 & D_6 & E_6 & G_6 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Dengan memisalkan

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{mz_G}{m-X_{\ddot{u}}} & \frac{-my_G}{m-X_{\ddot{u}}} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{mz_G}{m-Y_{\ddot{v}}} & 0 & \frac{(mx_G-Y_{\ddot{v}})}{m-Y_{\ddot{v}}} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{my_G}{m-Z_{\ddot{w}}} & -\frac{(mx_G+Z_{\ddot{q}})}{m-Z_{\ddot{w}}} & 0 \\ 0 & -\frac{mz_G}{I_x-K_{\ddot{p}}} & \frac{my_G}{I_x-K_{\ddot{p}}} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{mz_G}{I_y-M_{\ddot{q}}} & 0 & -\frac{(mx_G+M_{\ddot{w}})}{I_y-M_{\ddot{q}}} & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{my_G}{I_z-N_{\ddot{r}}} & \frac{(mx_G-N_{\ddot{v}})}{I_z-N_{\ddot{r}}} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 & T_3 & T_4 & T_5 & T_6 \\ T_7 & T_8 & T_9 & T_{10} & T_{11} & T_{12} \\ T_{13} & T_{14} & T_{15} & T_{16} & T_{17} & T_{18} \\ T_{19} & T_{20} & T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{25} & T_{26} & T_{27} & T_{28} & T_{29} & T_{30} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} & T_{35} & T_{36} \end{bmatrix}$$

Di mana

$$A = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 & T_3 & T_4 & T_5 & T_6 \\ T_7 & T_8 & T_9 & T_{10} & T_{11} & T_{12} \\ T_{13} & T_{14} & T_{15} & T_{16} & T_{17} & T_{18} \\ T_{19} & T_{20} & T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{25} & T_{26} & T_{27} & T_{28} & T_{29} & T_{30} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} & T_{35} & T_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 & e_1 & g_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 & e_2 & g_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 & e_3 & g_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 & e_4 & g_4 \\ a_5 & b_5 & c_5 & d_5 & e_5 & g_5 \\ a_6 & b_6 & c_6 & d_6 & e_6 & g_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 & L_4 & L_5 & L_6 \\ L_7 & L_8 & L_9 & L_{10} & L_{11} & L_{12} \\ L_{13} & L_{14} & L_{15} & L_{16} & L_{17} & L_{18} \\ L_{19} & L_{20} & L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \\ L_{25} & L_{26} & L_{27} & L_{28} & L_{29} & L_{30} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} & L_{35} & L_{36} \end{bmatrix}$$

Dengan $L_1 = T_1a_1 + T_2a_2 + T_3a_3 + T_4a_4 + T_5a_5 + T_6a_6$

$L_2 = T_1b_1 + T_2b_2 + T_3b_3 + T_4b_4 + T_5b_5 + T_6b_6$

$L_3 = T_1c_1 + T_2c_2 + T_3c_3 + T_4c_4 + T_5c_5 + T_6c_6$

$L_4 = T_1d_1 + T_2d_2 + T_3d_3 + T_4d_4 + T_5d_5 + T_6d_6$

$L_5 = T_1e_1 + T_2e_2 + T_3e_3 + T_4e_4 + T_5e_5 + T_6e_6$

$L_6 = T_1g_1 + T_2g_2 + T_3g_3 + T_4g_4 + T_5g_5 + T_6g_6$

$$L_7 = T_7a_1 + T_8a_2 + T_9a_3 + T_{10}a_4 + T_{11}a_5 + T_{12}a_6$$

$$L_8 = T_7b_1 + T_8b_2 + T_9b_3 + T_{10}b_4 + T_{11}b_5 + T_{12}b_6$$

$$L_9 = T_7c_1 + T_8c_2 + T_9c_3 + T_{10}c_4 + T_{11}c_5 + T_{12}c_6$$

$$L_{10} = T_7d_1 + T_8d_2 + T_9d_3 + T_{10}d_4 + T_{11}d_5 + T_{12}d_6$$

$$L_{11} = T_7e_1 + T_8e_2 + T_9e_3 + T_{10}e_4 + T_{11}e_5 + T_{12}e_6$$

$$L_{12} = T_7g_1 + T_8g_2 + T_9g_3 + T_{10}g_4 + T_{11}g_5 + T_{12}g_6$$

$$L_{31} = T_{31}a_1 + T_{32}a_2 + T_{33}a_3 + T_{34}a_4 + T_{35}a_5 + T_{36}a_6$$

$$L_{32} = T_{31}b_1 + T_{32}b_2 + T_{33}b_3 + T_{34}b_4 + T_{35}b_5 + T_{36}b_6$$

$$L_{33} = T_{31}c_1 + T_{32}c_2 + T_{33}c_3 + T_{34}c_4 + T_{35}c_5 + T_{36}c_6$$

$$L_{34} = T_{31}d_1 + T_{32}d_2 + T_{33}d_3 + T_{34}d_4 + T_{35}d_5 + T_{36}d_6$$

$$L_{35} = T_{31}e_1 + T_{32}e_2 + T_{33}e_3 + T_{34}e_4 + T_{35}e_5 + T_{36}e_6$$

$$L_{36} = T_{31}g_1 + T_{32}g_2 + T_{33}g_3 + T_{34}g_4 + T_{35}g_5 + T_{36}g_6$$

Berikutnya matriks B juga dihasilkan dari metode perkalian matriks yang sesuai dengan hasil matriks A di atas.

Penjelasan komponen matriks A dan matriks B pada persamaan (4.15) dan (4.16) pada Tabel 4.1 dan 4.2

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ dan } D = 0 \quad (4.17)$$

$$\text{jadi } \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} X_{prop} \\ \delta_r \\ \delta_s \\ K_{prop} \\ \delta_s \\ \delta_r \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Tabel 4.1. Nilai dari komponen Jacobi (matriks A)

$a_1 = \frac{\partial f_1}{\partial u} = \frac{2\bar{u}X_{ u u}}{m - X_{\bar{u}}}$	$b_1 = \frac{\partial f_1}{\partial v} = \frac{\bar{r}(X_{vr} + m)}{m - X_{\bar{u}}}$	$c_1 = \frac{\partial f_1}{\partial w} = \frac{\bar{q}(X_{wq} - m)}{m - X_{\bar{u}}}$
$a_2 = \frac{\partial f_2}{\partial u} = \frac{r Y_{ur} + v Y_{uv} + 2u Y_{uu} \delta_r - m r}{m - Y_{\bar{v}}}$	$b_2 = \frac{\partial f_2}{\partial v} = \frac{2\bar{v}Y_{ v v} + \bar{u}Y_{uv}}{m - Y_{\bar{v}}}$	$c_2 = \frac{\partial f_2}{\partial w} = \frac{\bar{p}(Y_{wp} + m)}{m - Y_{\bar{v}}}$
$a_3 = \frac{\partial f_3}{\partial u} = \frac{\bar{q} Z_{uq} + \bar{w} Z_{uw} + 2\bar{u} Z_{uu} \delta_s \delta_s + m\bar{q}}{m - Z_{\bar{w}}}$	$b_3 = \frac{\partial f_3}{\partial v} = \frac{\bar{p}(Z_{vp} - m)}{m - Z_{\bar{w}}}$	$c_3 = \frac{\partial f_3}{\partial w} = \frac{2\bar{w}Z_{ w w} + \bar{u}Z_{uw}}{m - Z_{\bar{w}}}$
$a_4 = \frac{\partial f_4}{\partial u} = \frac{m(\bar{q}y_G + \bar{r}z_G)}{I_x - K_{\bar{p}}}$	$b_4 = \frac{\partial f_4}{\partial v} = \frac{-m \bar{p}y_G}{I_x - K_{\bar{p}}}$	$c_4 = \frac{\partial f_4}{\partial w} = \frac{-m \bar{p}z_G}{I_x - K_{\bar{p}}}$
$a_5 = \frac{\partial f_5}{\partial u} = \frac{\bar{q}M_{uq} + \bar{w}M_{uw} + 2\bar{u}M_{uu} \delta_s \delta_s - m(\bar{q}x_G)}{I_y - M_{\bar{q}}}$	$b_5 = \frac{\partial f_5}{\partial v} = \frac{\bar{p}M_{vp} + m(\bar{r}z_G + \bar{p}x_G)}{I_y - M_{\bar{q}}}$	$c_5 = \frac{\partial f_5}{\partial w} = \frac{2\bar{w}M_{ww} + \bar{u}M_{uw} - m(\bar{q}z_G)}{I_y - M_{\bar{q}}}$
$a_6 = \frac{\partial f_6}{\partial u} = \frac{\bar{v}N_{uv} + 2\bar{u}N_{uu} \delta_r \delta_r + (N_{ur} - m x_G)\bar{r}}{I_z - N_{\bar{r}}}$	$b_6 = \frac{\partial f_6}{\partial v} = \frac{2\bar{v}N_{vv} + \bar{u}N_{uv} - m(\bar{r}y_G)}{I_z - N_{\bar{r}}}$	$c_6 = \frac{\partial f_6}{\partial w} = \frac{\bar{p}N_{wp} + m(\bar{p}x_G + \bar{q}y_G)}{I_z - N_{\bar{r}}}$
$d_1 = \frac{\partial f_1}{\partial p} = \frac{-m(\bar{q}y_G + \bar{r}z_G)}{m - X_{\bar{u}}}$	$e_1 = \frac{\partial f_1}{\partial q} = \frac{2\bar{q}X_{qq} + \bar{w}X_{wq} - m(\bar{w} - 2\bar{q}x_G + \bar{p}y_G)}{m - X_{\bar{u}}}$	$g_1 = \frac{\partial f_1}{\partial r} = \frac{\bar{v}X_{vr} + 2rX_{rr} + m(\bar{v} - 2\bar{r}x_G + \bar{p}z_G)}{m - X_{\bar{u}}}$
$d_2 = \frac{\partial f_2}{\partial p} = \frac{\bar{w}Y_{wp} + \bar{q}Y_{pq} + m(\bar{w} + 2\bar{p}y_G - \bar{q}x_G)}{m - Y_{\bar{v}}}$	$e_2 = \frac{\partial f_2}{\partial q} = \frac{\bar{p}Y_{pq} - m(\bar{r}z_G + \bar{p}x_G)}{m - Y_{\bar{v}}}$	$g_2 = \frac{\partial f_2}{\partial r} = \frac{2\bar{r}Y_{rr} + \bar{u}Y_{ur} - m(\bar{u} - 2\bar{r}y_G + \bar{q}z_G)}{m - Y_{\bar{v}}}$
$d_3 = \frac{\partial f_3}{\partial p} = \frac{\bar{v}Z_{vp} + \bar{r}Z_{rp} - m(-\bar{u} - 2\bar{q}z_G + \bar{r}y_G)}{m - Z_{\bar{w}}}$	$e_3 = \frac{\partial f_3}{\partial q} = \frac{2\bar{q}Z_{q q } + uZ_{uq} - m(-\bar{u} - 2\bar{q}z_G + \bar{r}y_G)}{m - Z_{\bar{w}}}$	$g_3 = \frac{\partial f_3}{\partial r} = \frac{\bar{p}Z_{rp} - m(\bar{p}x_G + \bar{q}y_G)}{m - Z_{\bar{w}}}$
$d_4 = \frac{\partial f_4}{\partial p} = \frac{2\bar{p}K_{p p } - m(\bar{v}y_G + \bar{w}z_G)}{I_x - K_{\bar{p}}}$	$e_4 = \frac{\partial f_4}{\partial q} = \frac{-[(I_z - I_y)\bar{r} - m\bar{u}y_G]}{I_x - K_{\bar{p}}}$	$g_4 = \frac{\partial f_4}{\partial r} = \frac{-[(I_z - I_y)q - m\bar{u}z_G]}{I_x - K_{\bar{p}}}$
$d_5 = \frac{\partial f_5}{\partial p} = \frac{\bar{v}M_{vp} + \bar{r}M_{rp} - [(I_x - I_z)\bar{r} + m(-\bar{v}x_G)]}{I_y - M_{\bar{q}}}$	$e_5 = \frac{\partial f_5}{\partial q} = \frac{2\bar{q}M_{qq} + \bar{u}M_{uq} - m(\bar{w}z_G + \bar{u}x_G)}{I_y - M_{\bar{q}}}$	$g_5 = \frac{\partial f_5}{\partial r} = \frac{\bar{p}M_{rp} - [(I_x - I_z)\bar{p} + m(-\bar{v}z_G)]}{I_y - M_{\bar{q}}}$
$d_6 = \frac{\partial f_6}{\partial p} = \frac{\bar{w}N_{wp} + \bar{q}N_{pq} - [(I_y - I_z)\bar{q} + m(-\bar{w}x_G)]}{I_z - N_{\bar{r}}}$	$e_6 = \frac{\partial f_6}{\partial q} = \frac{\bar{p}N_{pq} - [(I_y - I_z)\bar{p} + m(-\bar{w}y_G)]}{I_z - N_{\bar{r}}}$	$g_6 = \frac{\partial f_6}{\partial r} = \frac{2\bar{r}N_{rr} + \bar{u}N_{ur} - m(\bar{u}x_G + \bar{v}y_G)}{I_z - N_{\bar{r}}}$

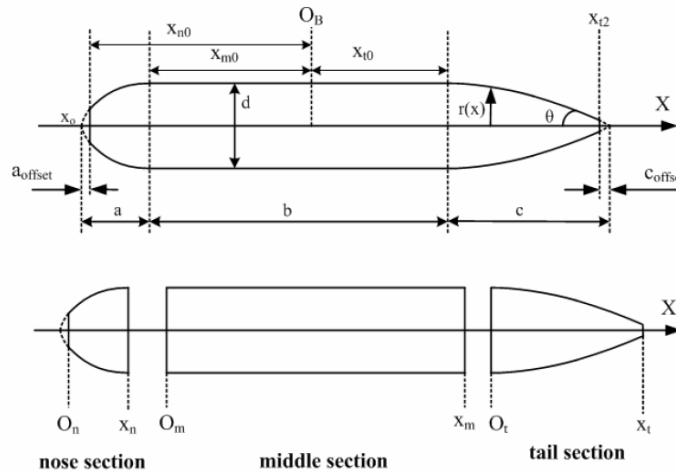
Tabel 4.2. Nilai dari komponen Jacobi (matriks B)

$A_1 = \frac{\partial f_1}{\partial X_{prop}} = \frac{1}{m - X_{\dot{u}}}$	$B_1 = \frac{\partial f_1}{\partial \delta_r} = 0$	$C_1 = \frac{\partial f_1}{\partial \delta_s} = 0$
$A_2 = \frac{\partial f_2}{\partial X_{prop}} = 0$	$B_2 = \frac{\partial f_2}{\partial \delta_r} = \frac{Y_{uu} \delta_r \bar{u}^2}{m - Y_{\dot{v}}}$	$C_2 = \frac{\partial f_2}{\partial \delta_s} = 0$
$A_3 = \frac{\partial f_3}{\partial X_{prop}} = 0$	$B_3 = \frac{\partial f_3}{\partial \delta_r} = 0$	$C_3 = \frac{\partial f_3}{\partial \delta_s} = \frac{Z_{uu} \delta_s \bar{u}^2}{m - Z_{\dot{w}}}$
$A_4 = \frac{\partial f_4}{\partial X_{prop}} = 0$	$B_4 = \frac{\partial f_4}{\partial \delta_r} = 0$	$C_4 = \frac{\partial f_4}{\partial \delta_s} = 0$
$A_5 = \frac{\partial f_5}{\partial X_{prop}} = 0$	$B_5 = \frac{\partial f_5}{\partial \delta_r} = 0$	$C_5 = \frac{\partial f_5}{\partial \delta_s} = \frac{\bar{u}^2 M_{uu} \delta_s}{I_y - M_{\dot{q}}}$
$A_6 = \frac{\partial f_6}{\partial X_{prop}} = 0$	$B_6 = \frac{\partial f_6}{\partial \delta_r} = \frac{\bar{u}^2 N_{uu} \delta_r}{I_z - N_{\dot{r}}}$	$C_6 = \frac{\partial f_6}{\partial \delta_s} = 0$
$D_1 = \frac{\partial f_1}{\partial K_{prop}} = 0$	$E_1 = \frac{\partial f_1}{\partial \delta_s} = 0$	$G_1 = \frac{\partial f_1}{\partial \delta_r} = 0$
$D_2 = \frac{\partial f_2}{\partial K_{prop}} = 0$	$E_2 = \frac{\partial f_2}{\partial \delta_s} = 0$	$G_2 = \frac{\partial f_2}{\partial \delta_r} = \frac{Y_{uu} \delta_r \bar{u}^2}{m - Y_{\dot{v}}}$
$D_3 = \frac{\partial f_3}{\partial K_{prop}} = 0$	$E_3 = \frac{\partial f_3}{\partial \delta_s} = \frac{Z_{uu} \delta_s \bar{u}^2}{m - Z_{\dot{w}}}$	$G_3 = \frac{\partial f_3}{\partial \delta_r} = 0$
$D_4 = \frac{\partial f_4}{\partial K_{prop}} = \frac{1}{I_x - K_{\dot{p}}}$	$E_4 = \frac{\partial f_4}{\partial \delta_s} = 0$	$G_4 = \frac{\partial f_4}{\partial \delta_r} = 0$
$D_5 = \frac{\partial f_5}{\partial K_{prop}} = 0$	$E_5 = \frac{\partial f_5}{\partial \delta_s} = \frac{\bar{u}^2 M_{uu} \delta_s}{I_y - M_{\dot{q}}}$	$G_5 = \frac{\partial f_5}{\partial \delta_r} = 0$
$D_6 = \frac{\partial f_6}{\partial K_{prop}} = 0$	$E_6 = \frac{\partial f_6}{\partial \delta_s} = 0$	$G_6 = \frac{\partial f_6}{\partial \delta_r} = \frac{\bar{u}^2 N_{uu} \delta_r}{I_z - N_{\dot{r}}}$

Proses linierisasi di atas yang menghasilkan model linier, tidak sepenuhnya linier karena ada beberapa sifat nonlinier yang masih terdapat pada komponen matriks A dan matriks B pada Tabel 4.1 dan 4.2

4.2 KOMPUTASI KOEFISIEN HIDRODINAMIKA

AUV dibagi menjadi tiga bagian yaitu *nose*, *middle* dan *tail* di mana dari perhitungan masing-masing komponen tersebut akan didapatkan koefisien dari *added mass*, *lift* dan *drag*. Tiga bagian dari AUV tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Penampang AUV (Yang, 2007)

Di mana nilai dari masing-masing parameter diberikan pada Tabel 4.3

Tabel 4.3. Nilai parameter pada AUV

Parameter	Nilai	Satuan	Deskripsi
a	0.105	m	Panjang nose
a_{offset}	0.0045	m	Ketebalan nose
b	0.530	m	Panjang middle
c	0.285	m	Panjang tail
c_{offset}	0.002	m	Ketebalan tail
d	0.18	m	Diam AUV
l	0.98	m	Panjang AUV
x_{n0}	0.415	m	Jarak Center body ke nose
x_{m0}	0.31	m	Jarak Center body ke middle
x_{t0}	0.22	m	Jarak Center body ke tail

fungsi distribusi sesuai bagian nose, middle dan tail ditunjukkan oleh

$$R_n(x) = \frac{1}{2}d \left[1 - \left(\frac{x - a_{offset} - a}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \quad (4.19)$$

$$R_t(x) = \frac{1}{2}d - \left[\frac{3d}{2c^2} - \frac{\tan \theta}{c} \right] (x - l)^2 + \left[\frac{d}{c^3} - \frac{\tan \theta}{c^2} \right] (x - l_f)^3 \quad (4.20)$$

Di mana $l_f = a + b - a_{offset}$ dan ρ densitas

4.2.1 Massa Tambah

Komponen koefisien hidrodinamika yang pertama akan dihitung, yakni added mass per satuan panjang silinder dengan formulasi sebagai berikut:

$$m_a(x) = \pi \rho R(x)^2 \quad (4.21)$$

di mana turunan pertama dari added mass per satuan panjang silinder seperti di bawah ini:

$$m'_a(x) = \pi \rho R'_n(x)^2 \quad (4.22)$$

$$\text{dengan } R'_n(x) = \frac{1}{2}d \left[1 - \left(\frac{x-a}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \text{ dan } R'_m(x) = \frac{1}{2}d \left[1 - \left(\frac{x-b}{b} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Berikutnya akan didapatkan tiga parameter karakteristik sebagai berikut

$$S_{n5} = \int_0^{x_n} m'_a(x) dx \quad (4.23)$$

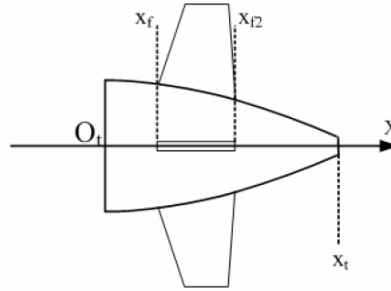
$$S_{n6} = \int_0^{x_n} x m'_a(x) dx \quad (4.24)$$

$$S_{n7} = \int_0^{x_n} x^2 m'_a(x) dx \quad (4.25)$$

Formulasi added mass pada tail dapat dituliskan sebagai berikut :

$$m_{af}(x) = \pi \rho \left(a_{fin}^2 - R(x)^2 + \frac{R(x)^4}{a_{fin}^2} \right) \quad (4.26)$$

di mana penampang dari tail adalah sebagai berikut :



Gambar 4.2. Penampang tail AUV (Yang, 2007)

di mana nilai dari masing-masing parameter tail diberikan pada Tabel 4.4

Tabel 4.4. Nilai parameter pada tail AUV

Parameter	Nilai	Satuan
$O_t - x_f$	0.13	m
$x_f - x_{f2}$	0.08	m
$x_f - x_t$	0.09	m

sehingga akan didapatkan tiga parameter karakteristik dari tail sebagai berikut:

$$S_{t5} = \int_0^{x_f} m_a(x) dx + \int_{x_f}^{x_{f2}} m_{af}(x) dx + \int_{x_{f2}}^{x_t} m_a(x) dx \quad (4.27)$$

$$S_{t6} = \int_0^{x_f} x m_a(x) dx + \int_{x_f}^{x_{f2}} x m_{af}(x) dx + \int_{x_{f2}}^{x_t} x m_a(x) dx \quad (4.28)$$

$$S_{t7} = \int_0^{x_f} x^2 m_a(x) dx + \int_{x_f}^{x_{f2}} x^2 m_{af}(x) dx + \int_{x_{f2}}^{x_t} x^2 m_a(x) dx \quad (4.29)$$

sehingga akan didapatkan koefisien added mass sebagai berikut:

$$Y_{\dot{v}} = -(S_{n5} + S_{m5} + S_{t5}) \quad (4.30)$$

$$Z_{\dot{w}} = Y_{\dot{v}} \quad (4.31)$$

$$M_{\dot{w}} = (S_{n6} + S_{m6} + S_{t6}) + (x_{n0}S_{n5} + x_{m0}S_{m5} + x_{t0}S_{t5}) \quad (4.32)$$

$$Z_{\dot{q}} = M_{\dot{w}} \quad (4.33)$$

$$N_{\dot{v}} = Y_{\dot{r}} = -M_{\dot{w}} \quad (4.34)$$

$$M_{\dot{q}} = -(S_{n7} + S_{m7} + S_{t7}) - 2(x_{n0}S_{n6} + x_{m0}S_{m6} + x_{t0}S_{t6}) - (x_{n0}^2S_{n5} + x_{m0}^2S_{m5} + x_{t0}^2S_{t5}) \quad (4.35)$$

$$N_{\dot{r}} = M_{\dot{q}} \quad (4.36)$$

$$X_{wq} = Z_{\dot{w}}, X_{qq} = Z_{\dot{q}}, X_{vr} = -Y_{\dot{v}}, X_{rr} = -Y_{\dot{r}} \quad (4.37)$$

$$X_{\dot{u}} = -\frac{4\alpha\rho\pi}{3} \left(\frac{l}{2}\right) \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (4.38)$$

$$K_{\dot{p}} = -\int_{x_f}^{x_{f2}} \frac{2}{\pi} \rho a_f^4 dx \quad (4.39)$$

$$Y_{ur} = X_{\dot{u}}, Y_{wp} = -Z_{\dot{w}}, Y_{pq} = -Z_{\dot{q}} \quad (4.40)$$

$$Z_{uq} = -X_{\dot{u}}, Z_{vp} = Y_{\dot{v}}, Z_{rp} = Y_{\dot{r}} \quad (4.41)$$

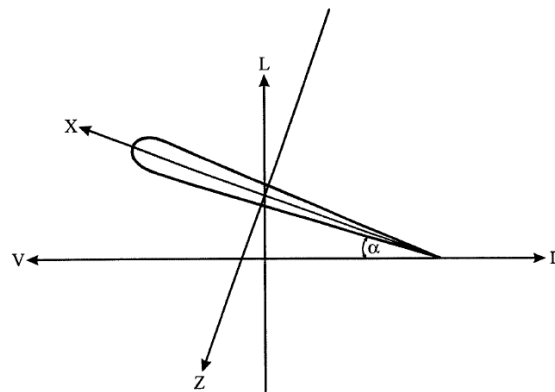
$$M_{uwa} = -(Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}}), M_{vp} = -Y_{\dot{r}}, M_{rp} = (K_{\dot{p}} - N_{\dot{r}}), M_{uq} = -Z_{\dot{q}} \quad (4.42)$$

$$N_{uva} = -(X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}}), N_{wp} = Z_{\dot{q}}, N_{pq} = -(K_{\dot{p}} - M_{\dot{q}}), N_{ur} = Y_{\dot{r}} \quad (4.43)$$

Notasi-notasi di atas adalah sebagaimana dijelaskan sebelumnya di Bab 2 dan daftar notasi.

4.2.2 Gaya Angkat

Komponen koefisien hidrodinamika berikutnya adalah lift atau gaya angkat dan drag atau gaya hambatan, di mana perhitungan gaya angkat dan gaya hambatan terkait dengan koefisien lift dan drag yang tampak pada Gambar 4.3 yang merepresentasikan gaya hambatan dan lift atau gaya angkat.



Gambar 4.3. Gaya lift dan drag pada bidang longitudinal

Komponen koefisien gaya angkat, yaitu body *lift* dan fin *lift* sebagai berikut :

$$c_{y d\beta} = \left(\frac{l}{d}\right) c_{y\beta} \quad (4.44)$$

di mana nilai $c_{y\beta} = 0,0003$ (Hoerner, 1965)

$$\text{dan } c_{yd} = \beta c_{yd\beta} \quad (4.45)$$

dengan β adalah *anggle of attack*

$$L_{body} = -\frac{1}{2}\rho d^2 c_{yd} u^2 \quad (4.46)$$

$$Y_{uvl} = Z_{uwl} = -\frac{1}{2}\rho d^2 c_{y\beta} \quad (4.47)$$

$$M_{uw} l = -N_{uvl} = -\frac{1}{2}\rho d^2 c_{y\beta} x_{cp} \quad (4.48)$$

formulasi fin lift dapat dituliskan dalam bentuk:

$$c_{L\alpha} = \left[\frac{1}{2\bar{\alpha}\pi} + \frac{1}{\pi AR_e} \right]^{-1} \quad (4.49)$$

di mana $c_{L\alpha} = \frac{C_L}{\alpha}$ dengan C_L koefisien lift pada fin, $\bar{\alpha}$ nilai faktor aproksimasi yang diberikan oleh Hoerner (1965) dan AR_e aspek rasio efektif fin. Perhitungan koefisien lift dan momen dapat dirumuskan dalam bentuk di bawah ini:

Koefisien lift

$$Y_{uu\delta_r} = -Y_{uvf} = \rho C_{L\alpha} S_{fin} \quad (4.50)$$

$$Z_{uu\delta_s} = -Z_{uwf} = -\rho C_{L\alpha} S_{fin} \quad (4.51)$$

$$Y_{uv} = Y_{uvl} + Y_{uvf} \quad (4.52)$$

$$Z_{uw} = Z_{uwl} + Z_{uwf} \quad (4.53)$$

Koefisien moment

$$M_{uu\delta_s} = M_{uwf} = \rho C_{L\alpha} S_{fin} x_{fin} \quad (4.54)$$

$$N_{uu\delta_r} = -N_{uvf} = \rho C_{L\alpha} S_{fin} x_{fin} \quad (4.55)$$

$$M_{uw} = M_{uwa} + M_{uwl} + M_{uwf} \quad (4.56)$$

$$N_{uv} = N_{uva} + N_{uvl} \quad (4.57)$$

di mana subscript l merepresentasikan gaya body lift, f gaya fin lift dan a koefisien added mass.

4.2.3 Gaya Hambatan

Dari Gambar 4.3 didapat dua persamaan yaitu persamaan (4.58) dan (4.59)

$$X = L \sin \alpha - D \cos \alpha \quad (4.58)$$

$$Z = -L \cos \alpha - D \sin \alpha \quad (4.59)$$

di mana $C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 S_{body}}$ dan $C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 S_{body}}$

C_L koefisien lift, C_D koefisien drag, ρ densitas fluida, S_{body} luas area body, dan V kecepatan aliran. Sehingga persamaan (4.58) dan (4.59) menjadi sebagai berikut :

$$X = \frac{1}{2}\rho V^2 S_{body} (C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha) \quad (4.60)$$

$$Z = -\frac{1}{2}\rho V^2 S_{body} (C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha) \quad (4.61)$$

karena diasumsikan semua sudut kecil sehingga didapatkan

$$\sin \alpha \approx \alpha$$

$$\cos \alpha \approx 1$$

Sehingga persamaan (4.60) dan (4.61) akan menjadi sebagai berikut

$$X = \frac{1}{2}\rho V^2 S_{body} (C_L \alpha - C_D) \quad (4.62)$$

$$Z = -\frac{1}{2}\rho V^2 S_{body} (C_L + C_D \alpha) \quad (4.63)$$

Dari gambar diatas terdapat hubungan sebagai berikut :

$$\frac{\partial V}{\partial U} = \frac{U}{V} = \cos \alpha \approx 1 \quad (4.64)$$

$$\frac{\partial V}{\partial w} = \frac{w}{V} = \sin \alpha \approx \alpha \approx 0 \quad (4.65)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial U} = -\frac{\sin \alpha}{V} \approx 0 \quad (4.66)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial w} = \frac{1}{U} \cong \frac{1}{V} \quad (4.67)$$

$$X_{uu} = \frac{\partial X}{\partial u} = \frac{\partial X}{\partial U} = \frac{\partial X}{\partial V} \frac{\partial V}{\partial U} + \frac{\partial X}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial U} \approx \frac{\partial X}{\partial V}$$

di mana $\frac{\partial X}{\partial V} = \rho V S_{body} (C_L \alpha - C_D)$

$$\text{sehingga } X_{uu} = \rho V S_{body} (C_L \alpha - C_D) \quad (4.68)$$

$$Z_{ww} = \frac{1}{V} \frac{\partial Z}{\partial \alpha} = \frac{1}{V} \left(-\frac{1}{2} \rho V^2 S_{body} C_D \right) \quad (4.69)$$

$$Z_{qq} = I_m Z_{ww} \quad (4.70)$$

$$M_{ww} = Z_{ww} I_m + X_{ww} t_m, \quad M_{qq} = I_m^2 Z_{ww} \quad (4.71)$$

$$Y_{vv} = Z_{ww}, Y_{rr} = -Z_{qq} \quad (4.72)$$

$$N_{vv} = -M_{ww}, N_{rr} = M_{qq} \quad (4.73)$$

4.2.4 Gaya Hidrostatik

Berikutnya adalah gaya hidrostatik yang telah dijelaskan pada Bab 2 dengan formulasi sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} X_{res} \\ Y_{res} \\ Z_{res} \\ K_{res} \\ M_{res} \\ N_{res} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(W - B) \sin \theta \\ (W - B) \cos \theta \sin \phi \\ (W - B) \cos \theta \cos \phi \\ (y_G W - y_b B) \cos \theta \cos \phi - (z_G W - z_b B) \cos \theta \sin \phi \\ -(z_G W - z_b B) \sin \theta - (x_G W - x_b B) \cos \theta \cos \phi \\ (x_G W - x_b B) \cos \theta \sin \phi + (y_G W - y_b B) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (4.74)$$

4.2.5 Gaya Dorong

Selanjutnya nilai dari gaya dan momen dorong ada yang telah dijelaskan pada Bab 2 dengan rumusan yang dapat dituliskan kembali seperti di bawah ini:

$$X_{prop} = \frac{1}{2} \rho D^4 K_T(J) |\omega_p| \omega_p \quad (4.75)$$

$$K_{prop} = \frac{1}{2} \rho D^5 K_T(J) |\omega_p| \omega_p \quad (4.76)$$

Notasi-notasi di atas adalah sebagaimana dijelaskan sebelumnya di bab 2 dan daftar notasi.

4.3 KETERKONTROLAN DAN KETERAMATAN

Uji keterkontrolan digunakan untuk mengetahui bagaimana sistem tersebut terkontrol atau tidak. Jika terbukti terkontrol, maka akan dilakukan kendali terhadap sistem. Uji keteramatan dilakukan untuk mengetahui apakah sistem dapat diamati. Ketika sistem teramati, artinya setiap perubahan sistem dapat diamati atau diukur.

4.3.1 Keterkontrolan

Sistem dikatakan terkontrol jika rank matriks keterkontrolan sama dengan dimensi dari sistem (Subiono, 2010). Matriks keterkontrolan dibentuk dari matriks A dan matriks B. di mana matriks keterkontrolan adalah sebagai berikut :

$Controlable = (B|AB|A^2B|...|A^{n-1}B) = 6$. Sehingga sistem terkontrol karena memiliki rank = 6

4.3.2 Keteramatan

Sistem dikatakan teramati jika rank keteramatan sama dengan dimensi dari sistem (Subiono, 2010). Matriks keteramatan dibentuk dari matriks A dan matriks C. di mana matriks keteramatan adalah sebagai berikut :

$$Observable = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{(n-1)} \end{pmatrix} = 6. \text{ Sehingga sistem teramati karena memiliki rank} = 6$$

4.4 DISKRITISASI MODEL LINIER AUV

Dalam algoritma KF, EnKF, EnKF-SR pada Tabel 2.5 - 2.7 sebagaimana telah dijelaskan pada Bab 2, yang hanya dapat diimplementasikan untuk sistem diskrit. Sehingga model linier AUV pada persamaan (4.18) terlebih dahulu didiskritkan dengan menggunakan metode beda hingga.

Perubahan variabel state terhadap waktu diaproksimasi dengan formula beda maju karena untuk mengestimasi satuan waktu ke depan. Dengan demikian, diperoleh

$$\dot{u} = \frac{du}{dt} \approx \frac{u_{k+1} - u_k}{\Delta t} \quad (4.77)$$

$$\dot{v} = \frac{dv}{dt} \approx \frac{v_{k+1} - v_k}{\Delta t} \quad (4.78)$$

$$\dot{w} = \frac{dw}{dt} \approx \frac{w_{k+1} - w_k}{\Delta t} \quad (4.79)$$

$$\dot{p} = \frac{dp}{dt} \approx \frac{p_{k+1} - p_k}{\Delta t} \quad (4.80)$$

$$\dot{q} = \frac{dq}{dt} \approx \frac{q_{k+1} - q_k}{\Delta t} \quad (4.81)$$

$$\dot{r} = \frac{dr}{dt} \approx \frac{r_{k+1} - r_k}{\Delta t} \quad (4.82)$$

Selanjutnya dilakukan proses diskritisasi pada model linier AUV pada persamaan (4.77)-(4.82), maka didapatkan sistem diskrit sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} u_{k+1} \\ v_{k+1} \\ w_{k+1} \\ p_{k+1} \\ q_{k+1} \\ r_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{m z_G}{m - \dot{X}_u} & \frac{-m y_G}{m - \dot{X}_u} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{m z_G}{m - \dot{Y}_v} + \frac{(m x_G - Y_{\dot{v}})}{m - \dot{Y}_v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{m y_G}{m - \dot{Z}_w} - \frac{(m x_G + Z_{\dot{w}})}{m - \dot{Z}_w} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{m z_G}{I_x - K_{\dot{p}}} & \frac{m y_G}{I_x - K_{\dot{p}}} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{m z_G}{I_y - M_{\dot{q}}} & 0 & -\frac{(m x_G + M_{\dot{w}})}{I_y - M_{\dot{q}}} & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{m y_G}{I_z - N_{\dot{r}}} & \frac{(m x_G - N_{\dot{r}})}{I_z - N_{\dot{r}}} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} a_{1k} & b_{1k} & c_{1k} & d_{1k} & e_{1k} & g_{1k} \\ a_{2k} & b_{2k} & c_{2k} & d_{2k} & e_{2k} & g_{2k} \\ a_{3k} & b_{3k} & c_{3k} & d_{3k} & e_{3k} & g_{3k} \\ a_{4k} & b_{4k} & c_{4k} & d_{4k} & e_{4k} & g_{4k} \\ a_{5k} & b_{5k} & c_{5k} & d_{5k} & e_{5k} & g_{5k} \\ a_{6k} & b_{6k} & c_{6k} & d_{6k} & e_{6k} & g_{6k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_{1k} & B_{1k} & C_{1k} & D_{1k} & E_{1k} & G_{1k} \\ A_{2k} & B_{2k} & C_{2k} & D_{2k} & E_{2k} & G_{2k} \\ A_{3k} & B_{3k} & C_{3k} & D_{3k} & E_{3k} & G_{3k} \\ A_{4k} & B_{4k} & C_{4k} & D_{4k} & E_{4k} & G_{4k} \\ A_{5k} & B_{5k} & C_{5k} & D_{5k} & E_{5k} & G_{5k} \\ A_{6k} & B_{6k} & C_{6k} & D_{6k} & E_{6k} & G_{6k} \end{pmatrix} \quad (4.83)$$

4.5 PENAMBAHAN FAKTOR STOKASTIK

Model linier pada persamaan (4.83) masih dalam bentuk deterministik. Oleh karena itu, harus ditambahkan faktor stokastik dalam bentuk noise pada masing-masing persamaan. Dengan demikian didapatkan model stokastik

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (4.84)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (4.85)$$

dengan $f(x_k, u_k)$ adalah fungsi linier dan non-linier.

Noise sistem w_k dan noise pengukuran v_k dalam hal ini dibangkitkan melalui komputer dan biasanya diambil berdistribusi normal serta mempunyai *mean* nol. Ssecara umum variansi noise sistem dinyatakan dengan Q_k dan variansi noise pengukuran dinyatakan dengan R_k , yaitu keduanya bergantung pada waktu.

Namun, dalam hal ini variansi kedua noise tersebut diasumsikan konstan. Matriks variansi noise sistem berbentuk persegi dan berukuran sesuai dengan ukuran kovariansi error dari estimasi. Sedangkan matriks variansi noise pengukuran berbentuk persegi tetapi berukuran sesuai dengan jumlah baris matriks observasi H yang dipilih. Selanjutnya metode KF dan EnKF dapat diterapkan pada model stokastik (4.84) dan (4.85) dengan menambahkan beberapa kondisi awal yang diperlukan.

4.6 PROSEDUR IMPLEMENTASI MODEL PADA ALGORITMA ENKF

Untuk mengestimasi pergerakan dan posisi AUV dari model yang ditunjukkan pada persamaan (4.83) pada metode EnKF, diperlukan model sistem dan model pengukuran

Dalam algoritma EnKF seperti yang tertuang dalam Tabel 2.6, model stokastik (4.84) disebut sebagai model sistem sedangkan model stokastik (4.85) disebut sebagai model pengukuran.

1. Inisialisasi step

- a. Membangkitkan N ensemble $x_{0,i} = [x_{0,1} \quad x_{0,2} \quad \dots \quad x_{0,N}]$

$$x_{0,i} = \begin{bmatrix} u_{0,i} \\ v_{0,i} \\ w_{0,i} \\ p_{0,i} \\ q_{0,i} \\ r_{0,i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{1,i} \\ w_{2,i} \\ w_{3,i} \\ w_{4,i} \\ w_{5,i} \\ w_{6,i} \end{bmatrix} \quad (4.86)$$

$$x_{0,i} = \begin{bmatrix} u_{0,1} & u_{0,2} & \dots & u_{0,N} \\ v_{0,1} & v_{0,2} & \dots & v_{0,N} \\ w_{0,1} & w_{0,2} & \dots & w_{0,N} \\ p_{0,1} & p_{0,2} & \dots & p_{0,N} \\ q_{0,1} & q_{0,2} & \dots & q_{0,N} \\ x_{0,1} & r_{0,2} & \dots & r_{0,N} \end{bmatrix} \quad (4.87)$$

b. Menentukan insialisasi $\hat{x}_0 = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} u_{0,1} + u_{0,2} + \dots + u_{0,N} \\ v_{0,1} + v_{0,2} + \dots + u_{0,N} \\ w_{0,1} + w_{0,2} + \dots + u_{0,N} \\ p_{0,1} + p_{0,2} + \dots + u_{0,N} \\ q_{0,1} + q_{0,2} + \dots + u_{0,N} \\ r_{0,1} + r_{0,2} + \dots + u_{0,N} \end{bmatrix} \quad (4.88)$

sehingga didapatkan matriks (6 x 1)

2. Tahap Prediksi

- a. Estimasi

$$\hat{x}_{k,i}^- = \begin{bmatrix} \hat{u}_{k,i}^- + w_{1,i} \\ \hat{v}_{k,i}^- + w_{2,i} \\ \hat{w}_{k,i}^- + w_{3,i} \\ \hat{p}_{k,i}^- + w_{4,i} \\ \hat{q}_{k,i}^- + w_{5,i} \\ \hat{r}_{k,i}^- + w_{6,i} \end{bmatrix} \quad (4.89)$$

$$\hat{x}_{k,i}^- = \begin{bmatrix} \hat{u}_{k-1,i}^- + w_{1,1} & \hat{u}_{k-1,i}^- + w_{1,2} & \cdots & \hat{u}_{k-1,i}^- + w_{1,N} \\ \hat{v}_{k-1,i}^- + w_{2,1} & \hat{v}_{k-1,i}^- + w_{2,2} & \cdots & \hat{v}_{k-1,i}^- + w_{2,N} \\ \hat{w}_{k-1,i}^- + w_{3,1} & \hat{w}_{k-1,i}^- + w_{3,2} & \cdots & \hat{w}_{k-1,i}^- + w_{3,N} \\ \hat{p}_{k-1,i}^- + w_{4,1} & \hat{p}_{k-1,i}^- + w_{4,2} & \cdots & \hat{p}_{k-1,i}^- + w_{4,N} \\ \hat{q}_{k-1,i}^- + w_{5,1} & \hat{q}_{k-1,i}^- + w_{5,2} & \cdots & \hat{q}_{k-1,i}^- + w_{5,N} \\ \hat{r}_{k-1,i}^- + w_{6,1} & \hat{r}_{k-1,i}^- + w_{6,2} & \cdots & \hat{r}_{k-1,i}^- + w_{6,N} \end{bmatrix} \quad (4.90)$$

$$\hat{x}_k^- = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{x}_{k,i}^- \quad (4.91)$$

sehingga didapatkan matriks \hat{x}_k^- (6 x 1)

- b. Kovarian error

$$P_k^- = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\hat{x}_{k,i}^- - \hat{x}_k^-)(\hat{x}_{k,i}^- - \hat{x}_k^-)^T \quad (4.92)$$

Sehingga akan didapatkan bentuk matriks (6 x N) x (N x 6) = (6 x 6)

3. Tahap Koreksi

$$z_{k,i} = Hx_{k,i} + v_{k,i} \quad (4.93)$$

$$z_{k,i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{k,i} \\ v_{k,i} \\ w_{k,i} \\ p_{k,i} \\ q_{k,i} \\ r_{k,i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{1,i} \\ v_{2,i} \\ v_{3,i} \\ v_{4,i} \\ v_{5,i} \\ v_{6,i} \end{bmatrix} \quad (4.94)$$

sehingga didapatkan matriks $z_{k,i}$ (6 x N)

- a. Kalman Gain

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R_k)^{-1} \quad (4.95)$$

Dari matriks diatas dapat diketahui bahwa matriks H adalah (6 x 6), matriks P_k^- (6 x 6) dan matriks R_k (6 x 6), sehingga akan didapatkan matriks (6x6)(6x6)[(6x6)(6x6)(6x6)+(6x6)] = (6 x 6)

- b. Estimasi

$$\hat{x}_{k,i} = \hat{x}_{k,i}^- + K_k (z_{k,i} - H \hat{x}_{k,i}^-) \quad (4.96)$$

dari yang diketahui bahwa $\hat{x}_{k,i}^-$ adalah matriks (6 x N) dan $z_{k,i}$ matriks (6 x N) dan didapatkan matriks $\hat{x}_{k,i}$ (6 x N) + (6 x 6) [(6 x N)-(6 x 6)(6 x N)] = (6 x N)

$$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{x}_{k,i} \quad (4.97)$$

sehingga didapatkan matriks \hat{x}_k (6 x 1)

- c. Kovarian error

$$P_k = [I - K_k H] P_k^- \quad (4.98)$$

sehingga matriks P_k is [(6 x 6) – (6 x 6) (6 x 6)] (6 x 6) = (6 x 6)

4.7 HASIL SIMULASI DAN ANALISA SISTEM NAVIGASI DAN PANDUAN

Pada penelitian ini sistem navigasi dan panduan AUV menggunakan tiga metode yaitu EnKF, EnKF-SR, dan KF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble pada sepuluh lintasan. Terdapat tiga sudut pandang pada penelitian ini yaitu

1. Perbandingan metode (jumlah ensemble dan lintasan sama)
2. Perbandingan jumlah ensemble (metode dan lintasan sama)
3. Perbandingan lintasan (metode dan jumlah lintasan sama)

Karena dengan membangkitkan ensemble sejumlah 300 lebih baik daripada 100, 200 dan 400 ensemble, sehingga pada analisa hasil akan dibahas perbandingan metode dengan jumlah ensemble 300 dan pada lintasan yang sama, sedangkan perbandingan dengan jumlah 100, 200 dan 400 ensemble terdapat pada lampiran A1. Perbandingan jumlah ensemble dengan metode dan lintasan yang sama juga dibahas pada analisa hasil. Sedangkan perbandingan lintasan dengan metode dan jumlah ensemble yang sama terdapat pada lampiran A5. Perbandingan antara dua metode yaitu EnKF dan KF, EnKF dan EnKF-SR dan KF terdapat lampiran A2–A4. Ketiga metode tersebut dibandingkan nilai RMSEnya sehingga didapatkan nilai akurasi posisi dan kecepatan. Pada penelitian ini, terdapat sepuluh kasus dalam menentukan lintasan pada model linier, di mana sepuluh lintasan tersebut yaitu:

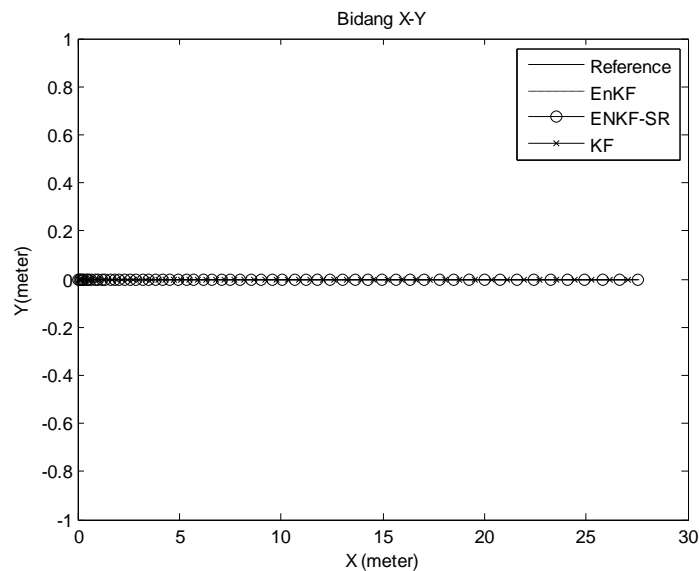
1. Lintasan pertama yaitu gerakan maju lurus tanpa belok dan *diving*.
2. Lintasan Kedua yaitu gerakan belok tanpa *diving*.
3. Lintasan ketiga yaitu gerakan *diving* tanpa belok.
4. Lintasan keempat yaitu gerakan belok dengan *diving*.
5. Lintasan kelima yaitu gerakan memutar tanpa *diving*.
6. Lintasan keenam yaitu gerakan memutar dengan *diving*.
7. Lintasan ketujuh yaitu gerakan memutar ellips tanpa *diving*.
8. Lintasan kedelapan yaitu gerakan memutar ellips dengan *diving*.
9. Lintasan kesembilan yaitu gerakan *diving* dan *emerging* tanpa belok.
10. Lintasan kesepuluh yaitu gerakan *diving* dan *emerging* dengan belok.

Hasil simulasi sistem navigasi dan panduan dengan sepuluh lintasan tersebut didapatkan suatu visualisasi dari kajian numerik selain RMSE masing-masing gerak dan posisi

4.7.1 Simulasi untuk Gerakan Lurus

Pada sub-bab ini simulasi dilakukan dengan menerapkan algoritma EnKF, EnKF-SR, dan KF pada model linier AUV. Hasil simulasi dievaluasi dengan cara membandingkan *reference* dengan hasil EnKF, EnKF-SR, dan KF.

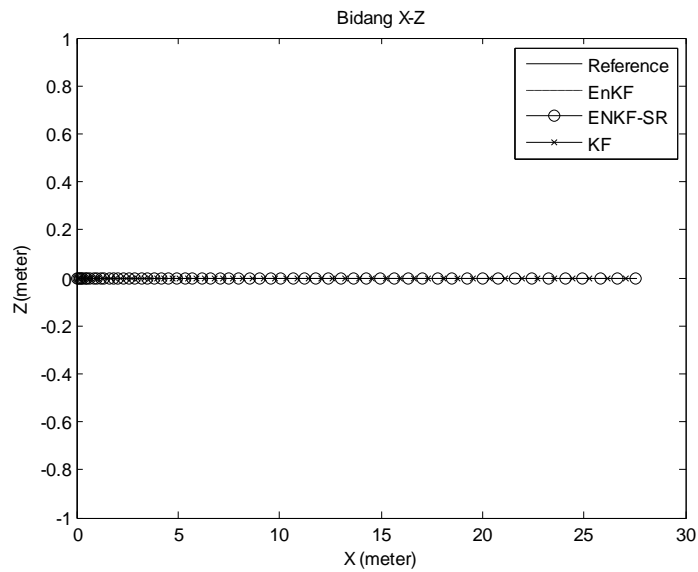
Simulasi ini menggunakan $\Delta t = 0,1$ serta dengan membangkitkan ensemble sejumlah 100, 200, 300 dan 400 ensemble. Titik awal yang diberikan pada setiap lintasan $x(0) = 0, y(0) = 0, \text{ dan } z(0) = 0$. Pada lintasan pada gerakan lurus, didapatkan hasil estimasi posisi pada bidang XY, XZ dan XYZ dengan menggunakan EnKF, EnKF-SR dan KF serta membangkitkan 300 ensemble pada Gambar 4.4–4.6. Selain itu ditampilkan tabel nilai rata-rata RMSE untuk EnKF, EnKF-SR, dan KF di mana EnKF dan EnKF-SR menggunakan 300 ensemble terdapat pada Tabel 4.5.



Gambar 4.4. Estimasi posisi berdasarkan gerakan lurus pada bidang XY

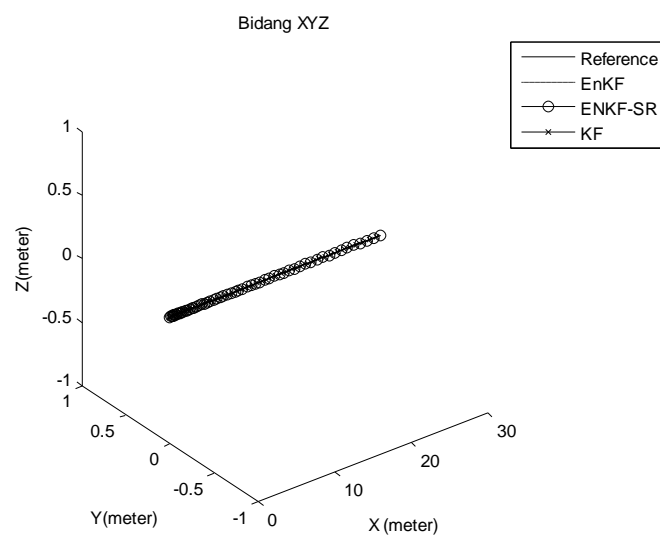
Pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa AUV mengikuti lintasan yang telah dibuat pada bidang XY, yaitu gerakan maju lurus. Di mana ketiga metode yaitu EnKF, EnKF-SR dan KF memiliki akurasi yang tinggi dengan tidak melebihi desain kriteria, yaitu error posisi maksimal kurang dari 3%. Penentuan error posisi maksimal kurang 3% berdasarkan beberapa penelitian terdahulu (Lamnas dkk,2007; Paull dkk,2014) yang menyebutkan error posisi berkisar 2%-5%. Error yang didapatkan ketika 3% adalah untuk posisi X yaitu 0.84 m, untuk posisi Y dan Z yaitu 0 m karena AUV tidak bergerak berbelok dan *diving*. Error yang didapatkan pada simulasi dengan membangkitkan 300 ensemble yang ditunjukkan pada Tabel 4.5 adalah posisi X error

terkecilnya yaitu 0.065861 m dengan metode EnKF-SR, berarti error Posisi X 6.6 cm dari target yang akan ditempuh sekitar 28 m.



Gambar 4.5. Estimasi posisi berdasarkan gerakan lurus pada bidang XZ

Pada Gambar 4.5, gerak AUV juga mengikuti lintasan dengan tidak melakukan *diving*. AUV dapat bergerak mengikuti lintasan baik pada bidang XY ataupun XZ. RMSE yang didapat untuk gerak translasi (surge, sway dan heave) dan rotasi (roll, pitch dan yaw) sangat kecil sehingga dapat mempengaruhi gerak AUV pada bidang XY dan XZ. RMSE gerak translasi dan rotasi dipengaruhi oleh perhitungan koefisien hidrodinamika dan pembangkitan sejumlah ensemble.



Gambar 4.6. Estimasi posisi berdasarkan gerakan lurus pada bidang XYZ

Pada bidang XYZ adalah gabungan lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dan XZ, selanjutnya ditampilkan dalam bidang tiga dimensi. Pada bidang XY, AUV bergerak mengikuti lintasan di mana AUV langsung maju lurus sampai posisi X, 28 m dan tidak melakukan gerak belok dan *diving* sehingga pada bidang XZ tampak bahwa AUV bergerak lurus di permukaan. Ketiga metode tersebut menunjukkan akurasi yang baik, tampak pada Tabel 4.5 dengan metode EnKF-SR terjadi error posisi 6.5 cm dari target yang dilalui yaitu 28 m, sedangkan dengan metode EnKF terjadi penyimpangan 6.6 cm dan metode KF terjadi penyimpangan 7 cm. Ketiga metode tersebut menghasilkan RMSE yang akurat dengan rata-rata 0.25%. Dari pengamatan tampak tingkat akurasi dari ketiga metode di atas dapat disimpulkan bahwa implementasi dari metode-metode tersebut pada suatu platform dapat dilakukan.

Tabel 4.5. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan lurus dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.066126 m	0.065861 m	0.070336 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m
u	0.011394 m/s	0.002067 m/s	0.011713 m/s
v	0.003339 m/s	0.0011836 m/s	0.0036542 m/s
w	0.0075713 m/s	0.00067742 m/s	0.0078194 m/s
p	0.003224 rad/s	0.0031887 rad/s	0.0032532 rad/s
q	0.004631 rad/s	0.0043029 rad/s	0.0046969 rad/s
r	0.001224 rad/s	0.0010264 rad/s	0.0017552 rad/s
Waktu simulasi	9.7856 s	9.7987 s	9.7613 s

Pada Tabel 4.5, tampak bahwa dengan membangkitkan 300 ensemble EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF. Tabel 4.5 menunjukkan bahwa waktu simulasi EnKF-SR lebih lama daripada EnKF dan KF karena proses skema akar kuadrat pada tahap koreksi di algoritma EnKF-SR. Perbandingan RMSE gerak translasi dan rotasi dari ketiga metode tersebut relatif kecil sehingga dapat mempengaruhi akurasi posisi pada masing-masing metode. RMSE surge dan roll yang berpengaruh pada posisi X pada EnKF-SR juga lebih akurat daripada EnKF dan KF. Error posisi X, Y dan Z menunjukkan bahwa penyimpangan posisi saat bergerak mengikuti lintasan, sedangkan Error kecepatan adalah kesalahan pengaturan pada kecepatan untuk gerak translasi dan rotasi yang juga mempengaruhi error posisi. Hasil simulasi dengan membangkitkan 100, 200 dan 400 ensemble pada lampiran Tabel A1.1–A1.3 menunjukkan bahwa dengan membangkitkan 100 ensemble metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF

dan KF baik untuk posisi maupun gerak translasi dan rotasi. Pada Tabel A1.2 dan A1.3 dengan membangkitkan 200 dan 400 ensemble menunjukkan bahwa metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF.

Tabel 4.6. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan lurus

	Lintasan 1 dengan EnKF			
	100	200	300	400
Posisi X	0.087412 m	0.077434 m	0.066126 m	0.087291 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m	0 m
u	0.014727 m/s	0.0094538 m/s	0.011394 m/s	0.013621 m/s
v	0.0058372 m/s	0.0022562 m/s	0.003339 m/s	0.0069869 m/s
w	0.010385 m/s	0.0046892 m/s	0.0075713 m/s	0.006374 m/s
p	0.0022822 rad/s	0.0030518 rad/s	0.003224 rad/s	0.0030691 rad/s
q	0.0041521 rad/s	0.0046431 rad/s	0.004631 rad/s	0.0043965 rad/s
r	0.00071592rad/s	0.00026163rad/s	0.001224 rad/s	0.00076283rad/s
Waktu simulasi	5.5579 s	7.5452 s	9.7856 s	12.0156 s

Pada Tabel 4.6, perbandingan antara metode EnKF pada lintasan untuk gerakan lurus menunjukkan bahwa membangkitkan 200 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 100, 300 dan 400 ensemble. RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih yang sedikit, hanya waktu simulasi untuk 400 ensemble lebih lama karena semakin banyak membangkitkan sejumlah ensemble maka semakin lama waktu simulasinya. Dengan 300 ensemble mempunyai error posisi X, yaitu 6.6 cm, 100 ensemble mempunyai error posisi X, yaitu 8.7 cm, 200 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 7.7 cm, sedangkan 400 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.7 cm.

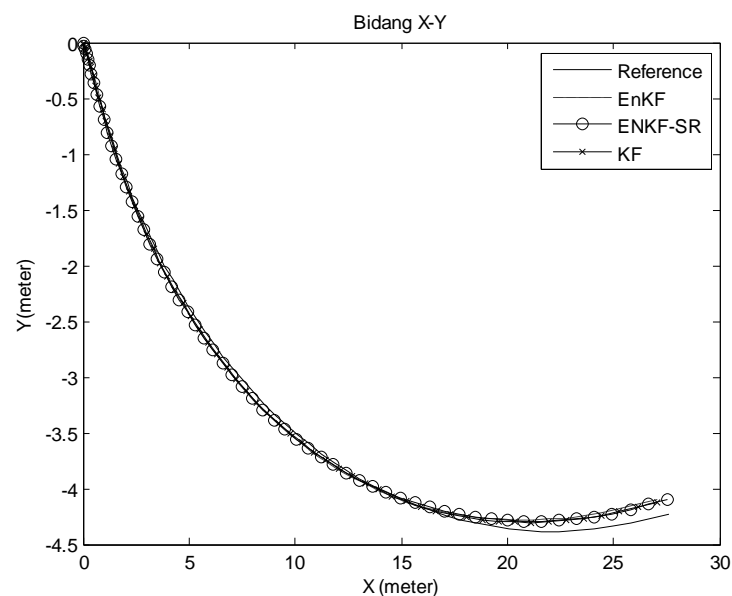
Tabel 4.7. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan lurus

	Lintasan 1 dengan EnKF-SR			
	100	200	300	400
Posisi X	0.08081 m	0.07532 m	0.065861 m	0.080982 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m	0 m
u	0.0021928 m/s	0.0006472 m/s	0.002067 m/s	0.00043366 m/s
v	0.00079759 m/s	0.00099908 m/s	0.0011836 m/s	0.001216 m/s
w	0.0018829 m/s	0.0011325 m/s	0.00067742 m/s	0.0023702 m/s
p	0.0014752 rad/s	0.0022747 rad/s	0.0031887 rad/s	0.0028334 rad/s
q	0.0035701 rad/s	0.004488 rad/s	0.0043029 rad/s	0.0046374 rad/s
r	0.00092072 rad/s	0.00008573 rad/s	0.0010264 rad/s	0.00081506 rad/s
Waktu simulasi	5.5754 s	7.5614 s	9.7987 s	12.0673 s

Pada Tabel 4.7, perbandingan antara metode EnKF-SR pada lintasan untuk gerakan lurus menunjukkan bahwa nilai RMSE dengan membangkitkan 100,200, 300 dan 400 ensemble hampir sama sehingga mempunyai akurasi yang sama. Dengan 300 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 6.5 cm, 100 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8cm, 200 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 7.5 cm, sedangkan 400 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8 cm.

4.7.2 Simulasi untuk Gerakan Belok

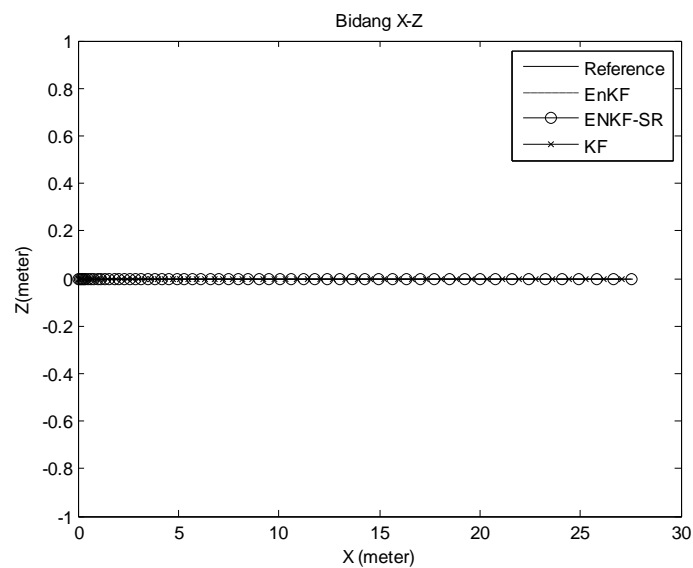
Pada simulasi ini menggunakan $\Delta t = 0,1$ serta dengan membangkitkan ensemble sejumlah 100, 200, 300 dan 400 ensemble. Titik awal yang diberikan pada setiap lintasan $x(0) = 0, y(0) = 0$, dan $z(0) = 0$. Dengan lintasan pada gerakan belok tanpa *diving*, didapatkan hasil estimasi posisi pada bidang XY. XZ dan XYZ dengan menggunakan EnKF, EnKF-SR dan KF serta membangkitkan 300 ensemble pada Gambar 4.7–4.9. Selain itu ditampilkan tabel nilai rata – rata RMSE untuk EnKF, EnKF-SR, dan KF di mana EnKF dan EnKF-SR menggunakan 300 ensemble terdapat pada Tabel 4.8.



Gambar 4.7. Estimasi posisi berdasarkan gerakan belok pada bidang XY

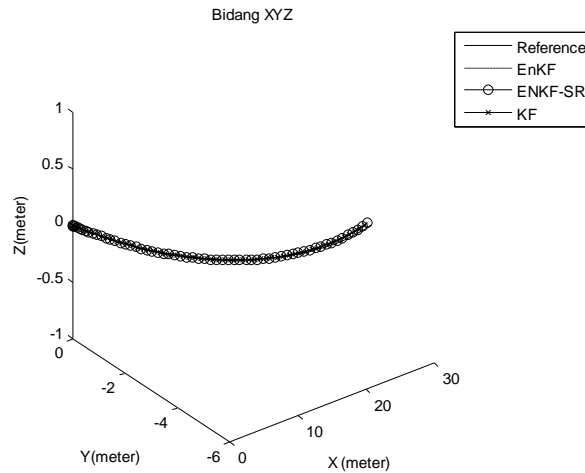
Pada Gambar 4.7 menunjukkan AUV bergerak mengikuti lintasan yang telah dibuat pada bidang XY. Ketiga metode yang digunakan yaitu EnKF, EnKF-SR dan KF memiliki akurasi yang tinggi dengan tidak melebihi desain kriteria yaitu error posisi

maksimal kurang dari 3%. Error yang didapatkan ketika 3% adalah untuk posisi X yaitu 0,84 m, untuk posisi Y yaitu 0.135 m dan untuk posisi Z yaitu 0 m karena hanya gerakan belok tanpa *diving*. Error yang didapatkan pada simulasi dengan membangkitkan 300 ensemble yang ditunjukkan pada Tabel 4.8 adalah posisi X error terkecilnya yaitu 0.072247 m, error Posisi X 7.2 cm dari target yang akan ditempuh sekitar 28 m atau terjadi error 0.258% dengan metode EnKF-SR. Error pada posisi Y yaitu 0.0048192 m, error Posisi Y 0.48 cm dari target yang akan ditempuh sekitar 4.5 m atau terjadi error 0.06% dengan metode EnKF-SR.



Gambar 4.8. Estimasi posisi berdasarkan Gerakan Belok pada bidang XZ

Pada Gambar 4.8, AUV juga bergerak mengikuti lintasan dengan tidak melakukan *diving*. AUV dapat mengikuti lintasan baik pada bidang XY ataupun XZ karena RMSE yang didapat untuk gerak translasi dan rotasi sangat kecil sehingga mempengaruhi gerak AUV pada bidang XY dan XZ. RMSE gerak translasi dan rotasi dipengaruhi oleh perhitungan koefisien hidrodinamika. Kesesuaian prosedur dalam penentuan nilai koefisien hidrodinamika dapat mengurangi error posisi. Ketepatan pemodelan matematika AUV pada persamaan (4.1)–(4.6), menunjukkan bahwa gerak translasi dan rotasi saling mempengaruhi. Sehingga RMSE yang sangat kecil pada gerak translasi dan rotasi akan berpengaruh pada error posisi X dan Y.



Gambar 4.9. Estimasi posisi berdasarkan gerakan belok pada bidang XYZ

Pada bidang XYZ adalah gabungan lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dan XZ kemudian ditampilkan dalam bidang tiga dimensi. Pada bidang XY, AUV bergerak mengikuti lintasan di mana AUV bergerak maju dan berbelok pada permukaan tanpa gerakan *diving*. Ketiga metode tersebut memiliki akurasi yang tinggi, tampak pada Tabel 4.8 dengan metode EnKF-SR pada posisi X terjadi error posisi 7.2 cm dari target yang dilalui yaitu 28 m dan posisi Y terjadi error posisi 0.48 cm dari target yang dilalui yaitu 4.5 m. Dengan metode EnKF pada posisi X terjadi penyimpangan 7.3 cm, pada posisi Y terjadi penyimpangan 0.58 cm dan metode KF pada posisi X terjadi penyimpangan 7.4 cm, posisi Y 0.6 cm.

Tabel 4.8. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan belok dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.073218 m	0.072247 m	0.074735 m
Posisi Y	0.0058236 m	0.0048192 m	0.0060487 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m
u	0.012344 m/s	0.0008455 m/s	0.012436 m/s
v	0.0045968 m/s	0.00060876 m/s	0.0048322 m/s
w	0.0048829 m/s	0.00013948 m/s	0.0054198 m/s
p	0.0028057 rad/s	0.0026316 rad/s	0.0030039 rad/s
q	0.0049658 rad/s	0.0048583 rad/s	0.0046835 rad/s
r	0.0007479 rad/s	0.0007022 rad/s	0.00081489 rad/s
Waktu simulasi	7.4063 s	7.4317 s	7.4063 s

Pada Tabel 4.10 tampak bahwa dengan membangkitkan 300 ensemble EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF. Metode EnKF SR memiliki error posisi dan gerak translasi serta rotasi yang lebih akurat daripada EnKF dan KF. Ini menunjukkan bahwa

error posisi X dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu X yaitu surge dan roll, sedangkan error posisi Y dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu Y yaitu sway dan yaw. Hasil simulasi dengan membangkitkan 100, 200 dan 400 ensemble pada lampiran Tabel A1.4–A1.6 menunjukkan bahwa dengan membangkitkan 100 dan 200 ensemble metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF baik untuk posisi maupun gerak translasi dan rotasi. Sedangkan dengan membangkitkan 400 ensemble menunjukkan bahwa metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF untuk posisi X yang dikarenakan gerakan surge dan roll yang akurat sedangkan untuk posisi Y metode KF lebih akurat dikarenakan gerakan sway dan lebih akurat daripada EnKF dan EnKF-SR.

Tabel 4.9. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan belok

	Lintasan 2 dengan EnKF			
	100	200	300	400
Posisi X	0.077255 m	0.082101 m	0.073218 m	0.080694 m
Posisi Y	0.016448 m	0.0053399 m	0.0058236 m	0.011112 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m	0 m
u	0.013258 m/s	0.010617 m/s	0.012344 m/s	0.013611 m/s
v	0.0026516 m/s	0.0023712 m/s	0.0045968 m/s	0.0053383 m/s
w	0.0099399 m/s	0.0092089 m/s	0.0048829 m/s	0.0095793 m/s
p	0.0034545 rad/s	0.0027291 rad/s	0.0028057 rad/s	0.0028789 rad/s
q	0.0047318 rad/s	0.0045952 rad/s	0.0049658 rad/s	0.0044448 rad/s
r	0.0007694 rad/s	0.00058487 rad/s	0.0007479 rad/s	0.0007919 rad/s
Waktu simulasi	5.3906	7.4063 s	10.0625 s	11.9844

Pada Tabel 4.9 menunjukkan perbandingan antara metode EnKF pada lintasan untuk gerakan belok menunjukkan bahwa membangkitkan 300 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 100, 200 dan 400 ensemble. Nilai RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih yang sedikit, Dengan 300 ensemble memiliki error posisi X yaitu 7.3 cm dan posisi Y yaitu 0.58 cm. 100 ensemble memiliki error posisi X yaitu 7.7 cm dan posisi Y yaitu 1.6 cm. 200 ensemble memiliki error posisi X yaitu 8.2 cm dan posisi Y yaitu 0.53 cm, sedangkan 400 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8 cm dan posisi Y yaitu 1.1 cm.

Pada Tabel 4.10 tampak bahwa dengan perbandingan antara metode EnKF-SR pada lintasan untuk gerakan belok menunjukkan bahwa membangkitkan 300 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 100, 200 dan 400 ensemble. Dari Tabel terlihat bahwa nilai RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih yang sedikit. Dengan 200 ensemble memiliki error posisi lebih akurat daripada yang lain, 100

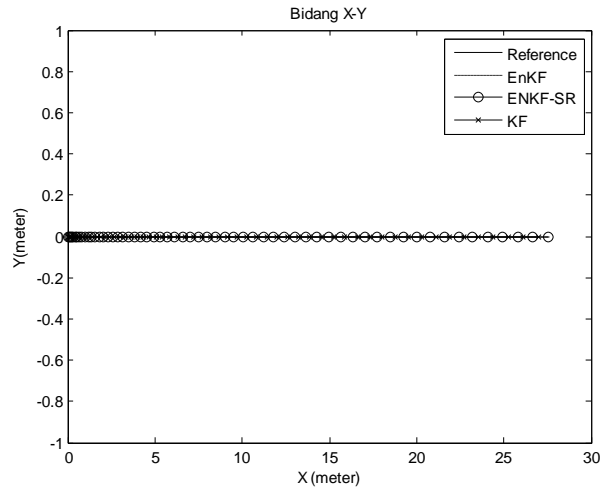
ensemble memiliki error gerakan translasi lebih akurat daripada yang lain, sedangkan 300 ensemble memiliki error gerakan rotasi lebih akurat daripada yang lain. Dengan 300 ensemble memiliki error posisi X yaitu 7.2 cm dan posisi Y yaitu 0.48 cm. 100 ensemble memiliki error posisi X yaitu 7.5 cm dan posisi Y yaitu 1.3 cm. 200 ensemble memiliki error posisi X yaitu 7.8 cm dan posisi Y yaitu 0.89 cm, sedangkan 400 ensemble memiliki error posisi X yaitu 7.69 cm dan posisi Y yaitu 1.2 cm.

Tabel 4.10. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan belok

	Lintasan 2 dengan EnKF-SR			
	100	200	300	400
Posisi X	0.075476 m	0.078191 m	0.072247 m	0.076993 m
Posisi Y	0.013241 m	0.0089068 m	0.0048192 m	0.012333 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m	0 m
u	0.00021059 m/s	0.00093253 m/s	0.0008455 m/s	0.00078911 m/s
v	0.00029389 m/s	0.0033185 m/s	0.00060876 m/s	0.0061278 m/s
w	0.0020835 m/s	0.002917 m/s	0.00013948 m/s	0.00067373 m/s
p	0.0030009 rad/s	0.0020728 rad/s	0.0026316 rad/s	0.0028475 rad/s
q	0.0049487 rad/s	0.0045544 rad/s	0.0048583 rad/s	0.0047968 rad/s
r	0.00075101 rad/s	0.00058715 rad/s	0.0007022 rad/s	0.0008081 rad/s
Waktu simulasi	5.4157	7.4317 s	10.0983 s	12.1541

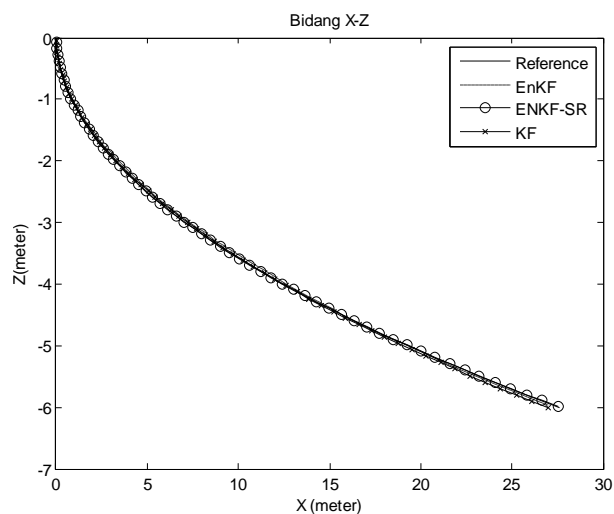
4.7.3 Simulasi untuk Gerakan Diving

Pada simulasi ini menggunakan $\Delta t = 0,1$ serta dengan membangkitkan ensemble sejumlah 100, 200, 300 dan 400 ensemble. Titik awal yang diberikan pada setiap lintasan $x(0) = 0, y(0) = 0$, dan $z(0) = 0$. Dengan lintasan pada gerakan *diving* tanpa belok, didapatkan hasil estimasi posisi pada bidang XY. XZ dan XYZ dengan menggunakan EnKF, EnKF-SR dan KF serta membangkitkan 300 ensemble pada Gambar 4.10–4.12. Selain itu ditampilkan tabel nilai rata-rata RMSE untuk EnKF, EnKF-SR, dan KF di mana EnKF dan EnKF-SR menggunakan 300 ensemble terdapat pada Tabel 4.11.



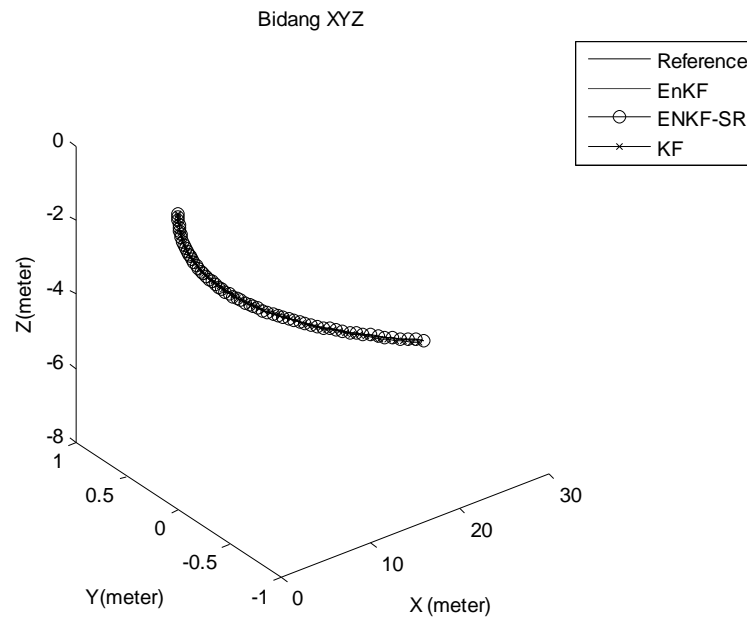
Gambar 4.10. Estimasi posisi berdasarkan gerakan *diving* pada bidang XY

Pada Gambar 4.10 tampak bahwa AUV bergerak mengikuti lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dengan gerakan maju lurus tanpa belok. Ketiga metode tersebut memiliki akurasi yang tinggi dengan tidak melebihi desain kriteria yaitu error posisi maksimal kurang dari 3%. Error yang didapatkan ketika 3% adalah untuk posisi X yaitu 0.84 m, untuk posisi Z yaitu 0.18 m dan untuk posisi Y yaitu 0 m karena hanya gerakan *diving* tanpa belok. Error yang didapatkan pada simulasi dengan membangkitkan 300 ensemble yang ditunjukkan pada Tabel 4.11 adalah posisi X error terkecilnya yaitu 0.077115 m atau terjadi error posisi 7.7 cm dari target yang dilalui yaitu 28 m atau terjadi error 0,217% dengan metode EnKF-SR, untuk posisi Z yaitu 0.001201 m terjadi error posisi 0.12 cm dari target yang dilalui yaitu 2 m atau terjadi error 0.0038% dengan metode EnKF-SR. Error posisi yang kecil pada ketiga metode tersebut disebabkan karena RMSE masing-masing DOF juga kecil.



Gambar 4.11. Estimasi posisi berdasarkan gerakan *diving* pada bidang XZ

Pada Gambar 4.11 AUV juga bergerak mengikuti lintasan dengan melakukan *diving*. AUV dapat mengikuti lintasan baik pada bidang XY ataupun XZ karena RMSE yang didapat untuk gerak dan rotasi sangat kecil sehingga mempengaruhi gerak AUV pada bidang XY dan XZ. RMSE gerak translasi dan rotasi dapat dipengaruhi oleh perhitungan koefisien hidrodinamika dan pembangkitan sejumlah ensemble.



Gambar 4.12. Estimasi posisi berdasarkan gerakan *diving* pada bidang XYZ

Pada bidang XYZ adalah gabungan lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dan XZ kemudian ditampilkan dalam bidang tiga dimensi. Pada bidang XY, AUV mengikuti lintasan di mana AUV bergerak maju dan *diving* tanpa gerakan belok. Ketiga metode tersebut sangat akurat, tampak pada Tabel 4.11 dengan metode EnKF-SR, pada posisi X terjadi error posisi 7.7 cm dari target yang dilalui yaitu 28 m atau terjadi error 0.276% dan posisi Z terjadi error posisi 0.12 cm dari target yang dilalui yaitu 7 m atau terjadi error 0.0035%, sedangkan dengan metode EnKF posisi X terjadi penyimpangan 7.7 cm, posisi Z terjadi penyimpangan 0.15 cm dan metode KF pada posisi X terjadi penyimpangan 7.7 cm, posisi Z terjadi penyimpangan 0.33 cm.

Tabel 4.11. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan *diving* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.077111 m	0.077115 m	0.077228 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0.0015987 m	0.001201 m	0.003388 m
u	0.0095598 m/s	0.00073222 m/s	0.01016 m/s
v	0.007583 m/s	0.0021067 m/s	0.0053815 m/s
w	0.0059214 m/s	0.00031637 m/s	0.0062817 m/s
p	0.0029775 rad/s	0.0027345 rad/s	0.0031416 rad/s
q	0.0045034 rad/s	0.0044188 rad/s	0.0045455 rad/s
r	0.00072153rad/s	0.00063406 rad/s	0.00081892 rad/s
Waktu simulasi	9.4611 s	9.4741 s	9.4531 s

Pada Tabel 4.11 tampak bahwa dengan membangkitkan 300 ensemble EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF untuk posisi, gerak translasi dan rotasi. Metode EnKF SR memiliki error posisi dan gerak translasi serta rotasi yang lebih akurat daripada EnKF dan KF. Ini menunjukkan bahwa error posisi X dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu X yaitu surge dan roll, sedangkan error posisi Z dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu Z yaitu heave dan pitch. Tabel A1.7–A1.9. Tabel A1.7 menunjukkan bahwa dengan membangkitkan 100 ensemble metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF baik untuk posisi maupun gerak translasi dan rotasi. Pada Tabel A1.8 dan A1.9 dengan membangkitkan 200 dan 400 ensemble menunjukkan bahwa metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF.

Tabel 4.12. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan *diving*

	Lintasan 3 dengan EnKF			
	100	200	300	400
Posisi X	0.061773 m	0.074192 m	0.077111 m	0.078533 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0.02164 m	0.00092401 m	0.0015987 m	0.0049002 m
u	0.011103 m/s	0.010909 m/s	0.0095598 m/s	0.012794 m/s
v	0.0099757 m/s	0.0058856 m/s	0.007583 m/s	0.0032313 m/s
w	0.011386 m/s	0.0073901 m/s	0.0059214 m/s	0.0078518 m/s
p	0.0031646 rad/s	0.0031353 rad/s	0.0029775 rad/s	0.0031092 rad/s
q	0.0043025 rad/s	0.004912 rad/s	0.0045034 rad/s	0.0047531 rad/s
r	0.001881 rad/s	0.00081072rad/s	0.00072153rad/s	0.0008784 rad/s
Waktu simulasi	5.3231 s	7.3243 s	9.4611 s	11.8594 s

Pada Tabel 4.12 tampak bahwa dengan perbandingan antara metode EnKF pada lintasan untuk gerakan *diving* menunjukkan bahwa membangkitkan 300 ensemble

lebih akurat daripada membangkitkan 100, 200 dan 400 ensemble. Dari Tabel terlihat bahwa nilai RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih yang sedikit. Dengan 300 ensemble memiliki error posisi X, yaitu 7.7 cm dan posisi Z, yakni 0.15 cm. 100 ensemble memiliki error posisi X yaitu 6.1 cm dan posisi Z yaitu 2.1 cm. 200 ensemble memiliki error posisi X yaitu 7.4 cm dan posisi Z yaitu 0.09 cm, sedangkan 400 ensemble memiliki error posisi X yaitu 7.8 cm dan posisi Z yaitu 0.49 cm.

Tabel 4.13. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan *diving*

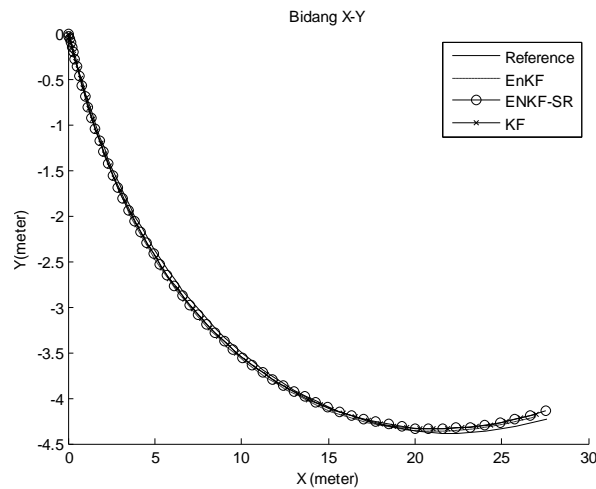
	Lintasan 3 dengan EnKF-SR			
	100	200	300	400
Posisi X	0.061024 m	0.073278 m	0.077115 m	0.077435 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0.0002282 m	0.0005181 m	0.001201 m	0.00021257 m
u	0.0030175 m/s	0.00016814 m/s	0.00073222 m/s	0.0012359 m/s
v	0.001368 m/s	0.0014091 m/s	0.0021067 m/s	0.00027892 m/s
w	0.00023605 m/s	0.00037363 m/s	0.00031637 m/s	0.00023569 m/s
p	0.0028225 rad/s	0.0029548 rad/s	0.0027345 rad/s	0.0030018 rad/s
q	0.0041425 rad/s	0.0046137 rad/s	0.0044188 rad/s	0.0045886 rad/s
r	0.0019841 rad/s	0.00039128 rad/s	0.00063406 rad/s	0.00089016 rad/s
Waktu simulasi	5.3347 s	7.3467 s	9.4741 s	11.8655 s

Pada Tabel 4.13 tampak bahwa dengan perbandingan antara metode EnKFSR, pada lintasan untuk gerakan *diving* menunjukkan bahwa membangkitkan 400 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 100, 200 dan 300 ensemble. Dari Tabel terlihat bahwa nilai RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih yang sedikit. Dengan 300 ensemble memiliki error posisi X yaitu 7.7 cm dan posisi Z yaitu 0.12 cm. 100 ensemble memiliki error posisi X yaitu 6.1 cm dan posisi Z yaitu 0.022 cm. 200 ensemble memiliki error posisi X yaitu 7.3 cm dan posisi Z yaitu 0.05 cm, sedangkan 400 ensemble memiliki error posisi X yaitu 7.7 cm dan posisi Z yaitu 0.021 cm.

4.7.4 Simulasi untuk Gerakan Belok dan Diving

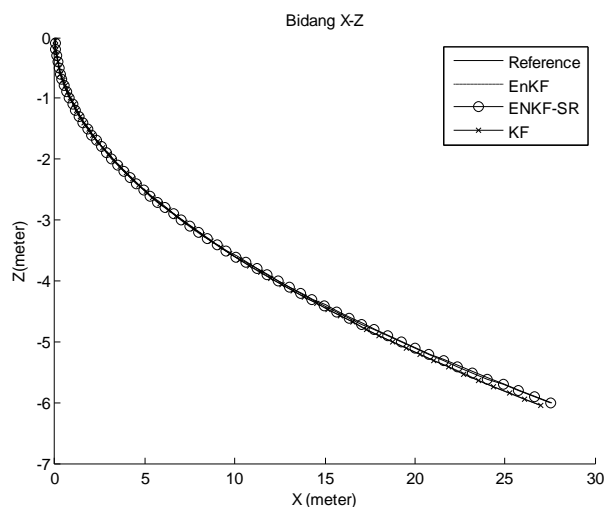
Pada simulasi ini menggunakan $\Delta t = 0,1$ serta dengan membangkitkan ensemble sejumlah 100, 200, 300 dan 400 ensemble. Titik awal yang diberikan pada setiap lintasan $x(0) = 0, y(0) = 0$, dan $z(0) = 0$. lintasan yang ditentukan untuk gerakan belok dan *diving* menghasilkan estimasi posisi pada bidang XY. XZ dan XYZ dengan menggunakan EnKF, EnKF-SR dan KF serta membangkitkan 300 ensemble pada Gambar 4.13–4.15. Selain itu ditampilkan tabel nilai rata – rata RMSE untuk EnKF,

EnKF-SR, dan KF di mana EnKF dan EnKF-SR menggunakan 300 ensemble terdapat pada Tabel 4.14.



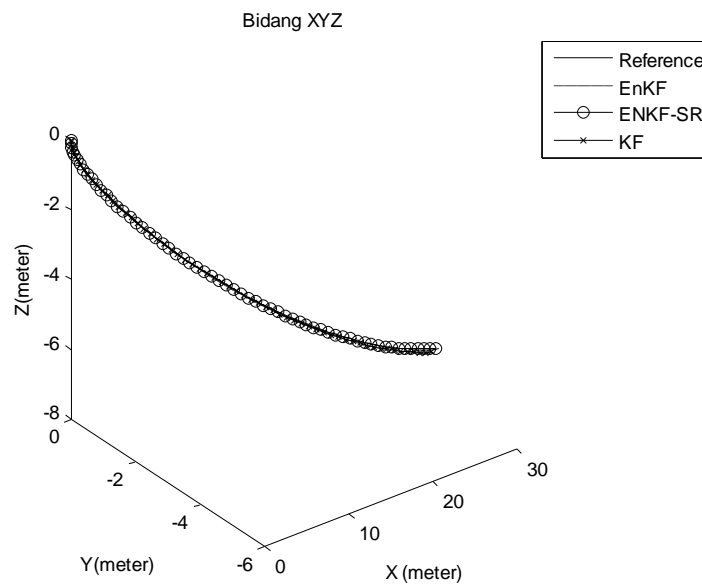
Gambar 4.13. Estimasi posisi pada gerakan belok dan *diving* pada bidang XY

Pada Gambar 4.13 tampak bahwa AUV melaju mengikuti lintasan yang telah dibuat pada bidang XY, di mana ketiga metode yaitu EnKF, EnKF-SR dan KF memiliki akurasi yang tinggi dengan tidak melebihi desain kriteria yaitu error posisi maksimal kurang dari 3%. Error yang didapatkan ketika 3% adalah untuk posisi X yaitu 0.81 m, untuk posisi Y yaitu 0.135 m dan untuk posisi Z yaitu 0.21 m. Error yang didapatkan pada simulasi dengan membangkitkan 300 ensemble yang ditunjukkan pada Tabel 4.14 adalah posisi X error terkecilnya yaitu 0.082299 m, berarti menyimpang 8.2 cm dari target yang akan ditempuh sekitar 28 m. Untuk posisi Y yaitu 0.010612 m yang berarti menyimpang 10.6 cm dari target yang akan ditempuh sekitar 4.5 m.



Gambar 4.14. Estimasi posisi pada gerakan belok dan *diving* pada bidang XZ

Pada Gambar 4.14 AUV juga mengikuti lintasan dengan tidak melakukan *diving*. AUV dapat mengikuti lintasan baik pada bidang XY ataupun XZ karena RMSE yang didapat untuk gerak translasi dan rotasi sangat kecil sehingga mempengaruhi gerak AUV pada bidang XY dan XZ. RMSE gerak translasi dan rotasi dipengaruhi oleh perhitungan koefisien hidrodinamika. Pada Tabel 4.14 tampak bawah posisi X error terkecilnya yaitu 0.082299 m, di mana menyimpang 8.2 cm dari target yang akan ditempuh sekitar 28 m dan posisi Z yaitu 0.0015547 m berarti menyimpang 0.15 cm dari target yang akan ditempuh pada kedalaman 6 m.



Gambar 4.15. Estimasi posisi pada gerakan belok dan *diving* pada bidang XYZ

Pada bidang XYZ yang tampak pada Gambar 4.15 adalah gabungan lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dan XZ. berikutnya ditampilkan dalam bidang tiga dimensi. Pada bidang XY, AUV melaju mengikuti lintasan di mana AUV langsung maju lurus kemudian belok. Pada bidang XZ, AUV melakukan gerakan maju dan *diving*. Ketiga metode tersebut memiliki akurasi yang tinggi, tampak pada Tabel 4.14 dengan metode EnKF-SR pada posisi X terjadi error posisi 8.2 cm dari target yang dilalui yaitu 28 m. Pada posisi Y terjadi error posisi 10.6 cm dari target yang dilalui 4.5 m sedangkan untuk posisi Z terjadi posisi 0.15 cm dari target yang dilalui yaitu 6 m. Hasil dari metode EnKF didapatkan bahwa pada posisi X terjadi penyimpangan 8.8 cm, dan pada posisi Y terjadi penyimpangan 1.09 cm dan error pada posisi Z yaitu 0.39 cm. Sedangkan dengan metode KF terjadi penyimpangan 8.6 cm pada posisi X, 1.06

cm pada posisi Y dan 0.42 cm pada posisi Z. Ketiga metode tersebut menghasilkan RMSE yang akurat dengan rata-rata 0.25 % untuk posisi X, 0.03% untuk posisi Y dan 0.2% untuk posisi Z. Melalui pengamatan menunjukkan akurasi dari ketiga metode di atas dapat disimpulkan bahwa implementasi dari metode-metode tersebut pada suatu platform dapat dilakukan.

Tabel 4.14. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan belok dan *diving* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.088299 m	0.082299 m	0.086292 m
Posisi Y	0.01098 m	0.010612 m	0.010643 m
Posisi Z	0.0039679 m	0.0015547 m	0.0042699 m
u	0.012743 m/s	0.00031244 m/s	0.011763 m/s
v	0.00616 m/s	0.00026765 m/s	0.0051707 m/s
w	0.0086723 m/s	0.0018985 m/s	0.007222 m/s
p	0.003099 rad/s	0.0029538 rad/s	0.0029839 rad/s
q	0.0047435 rad/s	0.0044007 rad/s	0.0045695 rad/s
r	0.00091753rad/s	0.00064506 rad/s	0.00080554 rad/s
Waktu simulasi	9.6132	9.6231	9.6094

Pada Tabel 4.14 tampak bahwa dengan membangkitkan 300 ensemble EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF untuk posisi dan gerakan translasi serta rotasi. Metode EnKF-SR memiliki error posisi dan gerak translasi serta rotasi yang lebih akurat daripada metode EnKF dan KF. Ini menunjukkan bahwa error posisi X dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu X yaitu surge dan roll, error posisi Y dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu Y yaitu sway dan yaw. Sedangkan error posisi Z dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu Z yaitu heave dan pitch. Tabel A1.10 dan A1.11 menunjukkan bahwa dengan membangkitkan 100 dan 200 ensemble metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF baik untuk posisi maupun gerak translasi dan rotasi, tetapi untuk posisi Y menunjukkan bahwa metode EnKF lebih akurat yang juga dipengaruhi oleh gerak sway dan yaw. Pada Tabel A1.12 dengan membangkitkan 400 ensemble menunjukkan bahwa metode EnKF lebih akurat daripada EnKF-SR dan KF. Namun untuk posisi X, dengan metode EnKF-SR lebih akurat karena gerak surge dan roll yang mempengaruhi posisi X juga mempunyai nilai RMSE yang lebih kecil dengan metode EnKF-SR.

Tabel 4.15. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan belok dan *diving*

	Lintasan 4 dengan EnKF			
	100	200	300	400
Posisi X	0.072227 m	0.077216 m	0.088299 m	0.082077 m
Posisi Y	0.0090404 m	0.0015294 m	0.01098 m	0.0013588 m
Posisi Z	0.012347 m	0.014739 m	0.0039679 m	0.00071287 m
u	0.011971 m/s	0.0083603 m/s	0.012743 m/s	0.013293 m/s
v	0.0024939 m/s	0.0009584 m/s	0.00616 m/s	0.0037197 m/s
w	0.0041066 m/s	0.0082609 m/s	0.0086723 m/s	0.0011569 m/s
p	0.0036524 rad/s	0.0032296 rad/s	0.003099 rad/s	0.002961 rad/s
q	0.0046654 rad/s	0.004282 rad/s	0.0047435 rad/s	0.0037729 rad/s
r	0.0007239 rad/s	0.00051761 rad/s	0.00091753 rad/s	0.00057333 rad/s
Waktu simulasi	5.3594	7.2813	9.6132	12.0114

Pada Tabel 4.15 menunjukkan perbandingan antara metode EnKF pada lintasan untuk gerakan belok dan *diving* menunjukkan bahwa membangkitkan 400 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 100, 200 dan 300 ensemble. RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih error posisi yang sedikit. Dengan 400 ensemble mempunyai error posisi X, yaitu 8.2 cm, error posisi Y yaitu 0.13 cm, error posisi Z yaitu 0.07 cm. 100 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 7.2 cm, error posisi Y yaitu 0.9 cm, error posisi Z yaitu 1.2 cm. 200 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 7.7 cm, error posisi Y yaitu 0.15 cm, error posisi Z yaitu 1.4 cm. Sedangkan 300 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.8 cm, error posisi Y yaitu 1 cm, error posisi Z yaitu 0.39 cm.

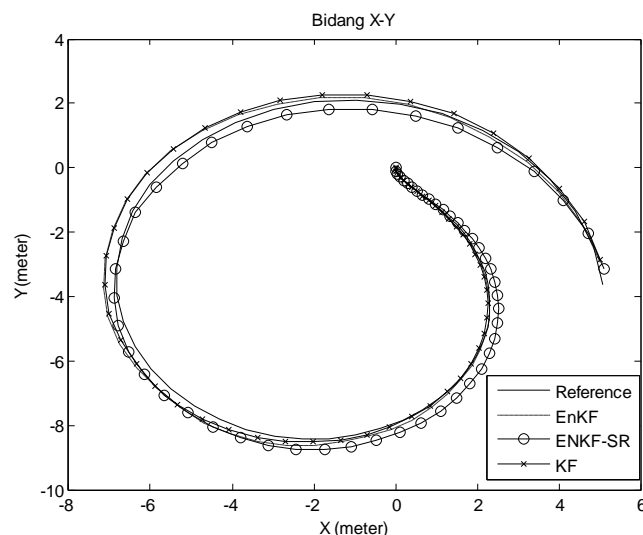
Tabel 4.16. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan belok dan *diving*

	Lintasan 4 dengan EnKF-SR			
	100	200	300	400
Posisi X	0.072114 m	0.076216 m	0.082299 m	0.078077 m
Posisi Y	0.012837 m	0.0085938 m	0.010612 m	0.011138 m
Posisi Z	0.00062027 m	0.0039313 m	0.0015547 m	0.0011345 m
u	0.00089294 m/s	0.0041512 m/s	0.00031244 m/s	0.0028775 m/s
v	0.0038356 m/s	0.00097276 m/s	0.00026765 m/s	0.0062112 m/s
w	0.0025255 m/s	0.00062322 m/s	0.0018985 m/s	0.0011319 m/s
p	0.0035997 rad/s	0.0030792 rad/s	0.0029538 rad/s	0.0025653 rad/s
q	0.003888 rad/s	0.0040748 rad/s	0.0044007 rad/s	0.0038333 rad/s
r	0.0008412 rad/s	0.00056956 rad/s	0.00064506 rad/s	0.00073158 rad/s
Waktu simulasi	5.3654	7.2912	9.6231	12.0456

Pada Tabel 4.16 tampak bahwa dengan perbandingan antara metode EnKF pada lintasan untuk gerakan belok dan *diving* menunjukkan bahwa membangkitkan 200 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 100, 300 dan 400 ensemble. Dari Tabel terlihat bahwa nilai RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih error posisi yang sedikit. Dengan 100 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 7.2 cm, error posisi Y yaitu 1.2 cm, error posisi Z yaitu 0.06 cm. 200 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 7.6 cm, error posisi Y yaitu 0.8 cm, error posisi Z yaitu 0.3 cm. 300 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.2 cm, error posisi Y yaitu 1 cm, error posisi Z yaitu 0.15 cm. Sedangkan 400 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 7.8 cm, error posisi Y yaitu 1.1 cm, error posisi Z yaitu 0.11 cm.

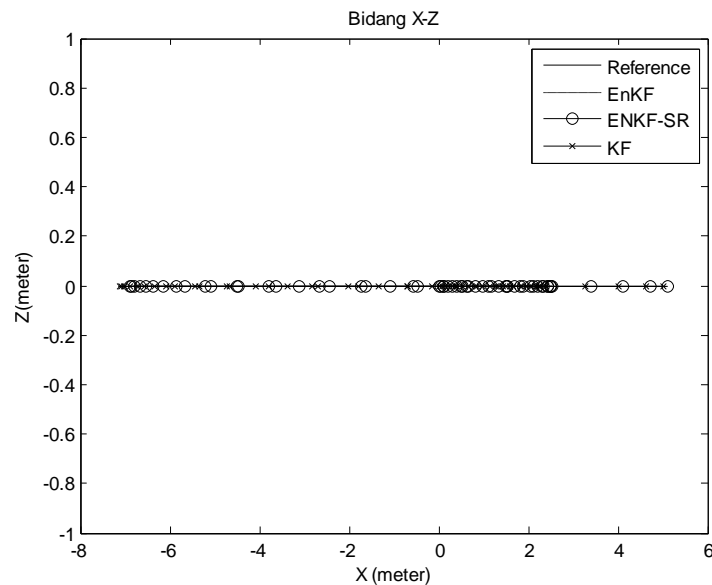
4.7.5 Simulasi untuk Gerakan Memutar

Pada simulasi ini menggunakan $\Delta t = 0,1$ serta dengan membangkitkan ensemble sejumlah 100, 200, 300 dan 400 ensemble. Titik awal yang diberikan pada setiap lintasan $x(0) = 0, y(0) = 0$, dan $z(0) = 0$. Dengan lintasan yang ditentukan untuk gerakan memutar tanpa *diving* didapatkan hasil estimasi posisi pada bidang XY. XZ dan XYZ dengan menggunakan EnKF, EnKF-SR dan KF serta membangkitkan 300 ensemble pada Gambar 4.16 –4.19. Selain itu ditampilkan tabel nilai rata – rata RMSE untuk EnKF, EnKF-SR, dan KF di mana EnKF dan EnKF-SR menggunakan 300 ensemble terdapat pada Tabel 4.17.



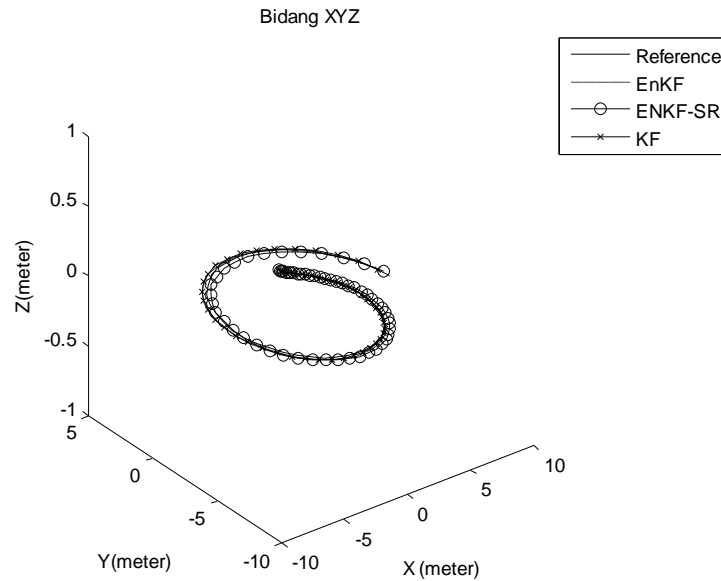
Gambar 4.16. Estimasi posisi pada gerakan memutar pada bidang XY

Pada Gambar 4.16 menggambarkan AUV bergerak mengikuti lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dengan gerakan memutar tanpa *diving*. Ketiga metode tersebut memiliki akurasi yang tinggi dengan tidak melebihi desain kriteria yaitu error posisi maksimal kurang dari 3%. Error yang didapatkan ketika 3% adalah untuk posisi X yaitu 0.36 m, posisi Y 0.42 m, posisi Z yaitu 0 m karena hanya gerakan memutar tanpa *diving*. Error yang didapatkan pada simulasi dengan membangkitkan 300 ensemble yang ditunjukkan pada Tabel 4.17 adalah posisi X error terkecilnya yaitu 0.028285 m atau terjadi error posisi 2.82 cm dari target yang dilalui yaitu 14 m atau terjadi error 0.235% dengan metode KF, untuk posisi Y yaitu 0.061261 m terjadi error posisi 6.1 cm dari target yang dilalui yaitu 14 m atau terjadi error 0.43% dengan metode EnKF-SR. Error posisi yang kecil pada ketiga metode tersebut disebabkan karena RMSE masing-masing DOF juga kecil.



Gambar 4.17. Estimasi posisi pada gerakan memutar pada bidang XZ

Pada Gambar 4.17 AUV juga melaju mengikuti lintasan dengan melakukan gerakan memutar tanpa *diving*. AUV dapat mengikuti lintasan baik pada bidang XY ataupun XZ karena RMSE yang didapat untuk gerak dan rotasi sangat kecil sehingga mempengaruhi gerak AUV pada bidang XY dan XZ.



Gambar 4.18. Estimasi posisi pada gerakan memutar pada bidang XYZ

Pada bidang XYZ adalah gabungan lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dan XZ, yang ditampilkan dalam bidang tiga dimensi. Pada bidang XY, AUV mengikuti lintasan di mana AUV bergerak maju dan *diving* tanpa gerakan belok. Ketiga metode tersebut sangat akurat, tampak pada Tabel 4.17 dengan metode EnKF-SR terjadi error posisi 2.82 cm dari target yang dilalui yaitu 14 m atau terjadi error 0.237% pada posisi X dan posisi Y terjadi error posisi 6.1 cm dari target yang dilalui yaitu 14 m atau terjadi error 0.437%. Pada metode EnKF terjadi penyimpangan 3 cm pada posisi X, dan posisi Z terjadi penyimpangan 9.6 cm. Dengan metode KF terjadi penyimpangan 2.84 cm pada posisi X dan posisi Z terjadi penyimpangan 10.3 cm.

Tabel 4.17. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.030961 m	0.028256 m	0.028485 m
Posisi Y	0.096866 m	0.061261 m	0.10387 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m
u	0.019529 m/s	0.0015657 m/s	0.026468 m/s
v	0.019982 m/s	0.002988 m/s	0.010415 m/s
w	0.039347 m/s	0.00073722 m/s	0.022982 m/s
p	0.039746 rad/s	0.039366 rad/s	0.04062 rad/s
q	0.0025489 rad/s	0.0021008 rad/s	0.0033295 rad/s
r	0.017597 rad/s	0.01648 rad/s	0.016806 rad/s
Waktu simulasi	9.5397 s	9.5534 s	9.5313 s

Pada Tabel 4.17 tampak bahwa dengan membangkitkan 300 ensemble EnKF-SR memiliki error posisi dan gerak translasi serta rotasi yang lebih akurat daripada EnKF dan KF. Ini menunjukkan bahwa error posisi X dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu X yaitu surge dan roll, error posisi Y dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu Y yaitu sway dan yaw. Tabel 4.17 dapat menunjukkan bahwa error yang dihasilkan oleh gerakan akan berpengaruh pada error posisi. Tabel A1.13 menunjukkan bahwa dengan membangkitkan 100 ensemble metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF baik untuk posisi maupun gerak translasi dan rotasi. Tabel A1.14 dan A1.15 dengan membangkitkan 200 dan 400 ensemble menunjukkan bahwa metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF.

Tabel 4.18. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan memutar

	Lintasan 5 dengan EnKF			
	100	200	300	400
Posisi X	0.040295 m	0.021278 m	0.030961 m	0.027445 m
Posisi Y	0.1188 m	0.12637 m	0.096866 m	0.12054 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m	0 m
u	0.0042156 m/s	0.03944 m/s	0.019529 m/s	0.038282 m/s
v	0.034025 m/s	0.0040242 m/s	0.019982 m/s	0.0021905 m/s
w	0.0025656 m/s	0.030086 m/s	0.039347 m/s	0.028276 m/s
p	0.04379 rad/s	0.041091 rad/s	0.039746 rad/s	0.038444 rad/s
q	0.0092507 rad/s	0.0062846 rad/s	0.0025489 rad/s	0.0038976 rad/s
r	0.019565 rad/s	0.01395 rad/s	0.017597 rad/s	0.015236 rad/s
Waktu simulasi	5.3594 s	7.3321 s	9.5397 s	12.3979 s

Pada Tabel 4.18 tampak bahwa dengan perbandingan antara metode EnKF pada lintasan untuk gerakan memutar menunjukkan bahwa dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble memiliki kekauratan yang hampir sama dan tidak ada yang lebih dominan. Dengan 100 ensemble memiliki error posisi X yaitu 6.6 cm dan error posisi Y yaitu 11 cm. 200 ensemble memiliki error posisi X yaitu 2.1 cm dan error posisi Y yaitu 12 cm. 300 ensemble memiliki error posisi X yaitu 3 cm dan error posisi Y yaitu 9.6 cm. Sedangkan 400 ensemble memiliki error posisi X yaitu 2.7 cm dan error posisi Y yaitu 12 cm.

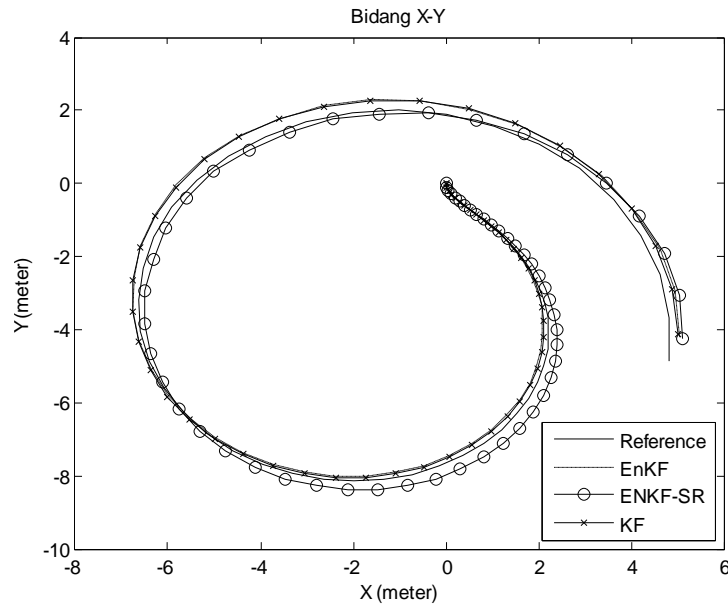
Tabel 4.19. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan memutar

	Lintasan 5 dengan EnKF-SR			
	100	200	300	400
Posisi X	0.038927 m	0.019923 m	0.028256 m	0.025314 m
Posisi Y	0.090251 m	0.086038 m	0.061261 m	0.082272 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m	0 m
u	0.00038069 m/s	0.0011666 m/s	0.0015657 m/s	0.0014895 m/s
v	0.0054026 m/s	0.0039263 m/s	0.002988 m/s	0.0013768 m/s
w	0.0049221 m/s	0.001441 m/s	0.00073722 m/s	0.004439 m/s
p	0.042444 rad/s	0.040675 rad/s	0.039366 rad/s	0.037556 rad/s
q	0.0096826 rad/s	0.0089163 rad/s	0.0021008 rad/s	0.0060924 rad/s
r	0.015664 rad/s	0.013536 rad/s	0.01648 rad/s	0.014949 rad/s
Waktu simulasi	5.3671 s	7.3438 s	9.5534 s	12.4178 s

Perbandingan antara jumlah ensemble pada metode EnKF-SR dan lintasan untuk gerakan memutar pada Tabel 4.18, menunjukkan bahwa membangkitkan 300 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 100, 200 dan 400 ensemble. Dari Tabel terlihat bahwa nilai RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih error posisi yang sedikit. Dengan 100 ensemble memiliki error posisi X yaitu 3.8 cm dan error posisi Y yaitu 9 cm. 200 ensemble memiliki error posisi X yaitu 1.9 cm dan error posisi Y yaitu 8.6 cm. 300 ensemble memiliki error posisi X yaitu 2.8 cm dan error posisi Y yaitu 6.1 cm. Sedangkan 400 ensemble memiliki error posisi X yaitu 2.5 cm dan error posisi Y yaitu 8.2 cm.

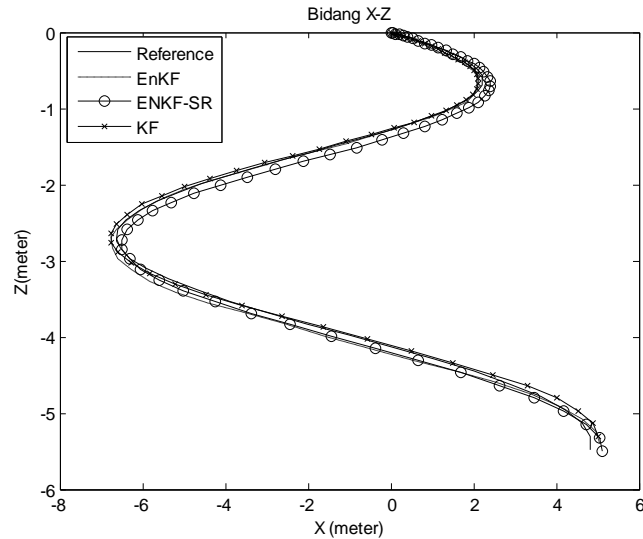
4.7.6 Simulasi untuk Gerakan Memutar dan Diving

Pada simulasi ini menggunakan $\Delta t = 0,1$ serta dengan membangkitkan ensemble sejumlah 100, 200, 300 dan 400 ensemble. Titik awal yang diberikan pada setiap lintasan $x(0) = 0, y(0) = 0$, dan $z(0) = 0$. Dengan lintasan pada gerakan memutar dan *diving*, didapatkan hasil estimasi posisi pada bidang XY, XZ dan XYZ dengan menggunakan EnKF, EnKF-SR dan KF serta membangkitkan 300 ensemble pada gambar 4.19–4.21. Selain itu ditampilkan tabel nilai rata – rata RMSE untuk EnKF, EnKF-SR, dan KF di mana EnKF dan EnKF-SR menggunakan 300 ensemble terdapat pada Tabel 4.20.



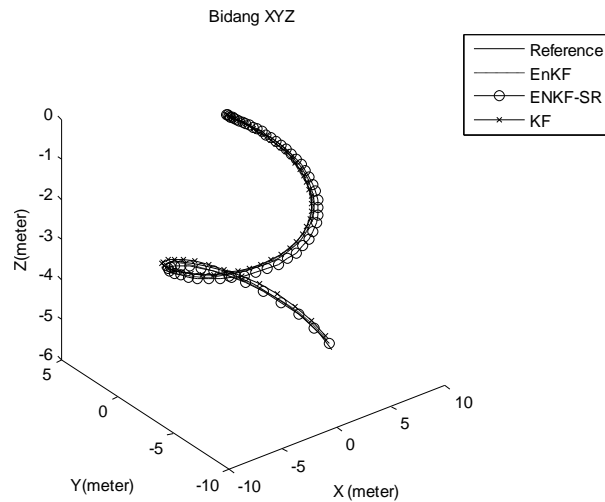
Gambar 4.19. Estimasi posisi pada gerakan memutar dan *diving* pada bidang XY

Pada Gambar 4.19 tampak bahwa AUV mengikuti lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dengan gerakan memutar dan *diving*. Ketiga metode tersebut memiliki akurasi yang tinggi dengan tidak melebihi desain kriteria yaitu error posisi maksimal kurang dari 3%. error yang didapatkan ketika 3% adalah untuk posisi X yaitu 0.18 m, untuk posisi Y yaitu 0.42 m dan untuk posisi Z yaitu 0.6 m. Tabel 4.20 menunjukkan hasil simulasi dengan membangkitkan 300 ensemble adalah posisi X error terkecilnya yaitu 0.019011 m atau terjadi penyimpangan posisi 1.9 cm dari target yang dilalui yaitu 14 m atau terjadi error 0.31% dengan metode EnKF-SR. Untuk posisi Y yaitu 0.099115 m terjadi error posisi 9.9 cm dari target yang dilalui yaitu 14 m atau terjadi error 0.7% dengan metode EnKF-SR. Untuk posisi Z yaitu 0.0023812 m terjadi error posisi 0.23 cm dari target yang dilalui yaitu 20 m atau terjadi error 0.01% dengan metode EnKF-SR. Error posisi yang kecil pada ketiga metode tersebut disebabkan karena RMSE masing-masing DOF juga kecil.



Gambar 4.20. Estimasi posisi pada gerakan memutar dan *diving* pada bidang XZ

Pada Gambar 4.20 AUV juga mengikuti lintasan dengan melakukan *diving*. AUV dapat mengikuti lintasan baik pada bidang XY ataupun XZ. Pada bidang XY, AUV mengikuti lintasan di mana AUV langsung berbelok ke kiri pada posisi X, 2 m kemudian berputar membentuk lintasan mirip lingkaran. Pada bidang XZ, AUV bergerak menyelam sampai kedalaman 4 m setelah itu AUV agak berputar disertai gerakan meyelam sampai kedalaman 20 m. RMSE yang didapat untuk gerak dan rotasi sangat kecil sehingga mempengaruhi gerak AUV pada bidang XY dan XZ.



Gambar 4.21. Estimasi posisi pada gerakan memutar dan *diving* pada bidang XYZ

Pada bidang XYZ adalah gabungan lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dan XZ kemudian ditampilkan dalam bidang tiga dimensi. Pada bidang XY, AUV mengikuti lintasan di mana AUV bergerak maju kemudian memutar dan *diving*. Pada

Tabel 4.20 menunjukkan bahwa dengan metode EnKF-SR, pada posisi X terjadi error posisi 1.9 cm dari target yang dilalui yaitu 14 m atau terjadi error 0.316 % dan posisi Y terjadi error posisi 9.9 cm dari target yang dilalui yaitu 14 m atau terjadi error 0.7% posisi Z terjadi error posisi 0.23 cm dari target yang dilalui yaitu 7 m atau terjadi error 0.011%. Dengan metode EnKF posisi X terjadi penyimpangan 1.92 cm, posisi Y terjadi penyimpangan 13.1 cm, posisi Z terjadi penyimpangan 8.8cm dan metode KF pada posisi X terjadi penyimpangan 2 cm, posisi Y terjadi penyimpangan 12 cm, posisi Z terjadi penyimpangan 9.2 cm.

Tabel 4.20. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar dan *diving* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.019216 m	0.019011 m	0.020004 m
Posisi Y	0.13108 m	0.099115 m	0.12005 m
Posisi Z	0.088234 m	0.0023812 m	0.092981 m
u	0.0094504 m/s	0.0033908 m/s	0.024372 m/s
v	0.010827 m/s	0.00085586 m/s	0.0075142 m/s
w	0.022799 m/s	0.0022694 m/s	0.025341 m/s
p	0.041029 rad/s	0.040851 rad/s	0.04175 rad/s
q	0.0028695 rad/s	0.0023867 rad/s	0.0034412 rad/s
r	0.016837 rad/s	0.016187 rad/s	0.016555 rad/s
Waktu simulasi	9.4421 s	9.4531 s	9.4375 s

Pada Tabel 4.20 tampak bahwa dengan membangkitkan 300 ensemble EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF untuk gerak translasi dan posisi. Metode EnKF SR memiliki error posisi dan gerak translasi serta rotasi yang lebih akurat daripada EnKF dan KF. Ini menunjukkan bahwa error posisi X dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu X yaitu surge dan roll, dan error posisi Y dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu Y yaitu sway dan yaw, sedangkan error posisi Z dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu Z yaitu heave dan pitch. Tabel A1.16 menunjukkan bahwa dengan membangkitkan 100 ensemble metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF baik untuk posisi maupun gerak translasi dan rotasi. Tabel A1.17 dan A1.18 dengan membangkitkan 200 dan 400 ensemble menunjukkan bahwa metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF.

Tabel 4.21. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan memutar dan *diving*

	Lintasan 6 dengan EnKF			
	100	200	300	400
Posisi X	0.0012489 m	0.064673 m	0.019216 m	0.028999 m
Posisi Y	0.11206 m	0.13047 m	0.13108 m	0.12048 m
Posisi Z	0.095792 m	0.10108 m	0.088234 m	0.092151 m
u	0.03153 m/s	0.0035162 m/s	0.0094504 m/s	0.014346 m/s
v	0.015629 m/s	0.026508 m/s	0.010827 m/s	0.0035777 m/s
w	0.01715 m/s	0.026256 m/s	0.022799 m/s	0.024067 m/s
p	0.040994 rad/s	0.039289 rad/s	0.041029 rad/s	0.038197 rad/s
q	0.0041125 rad/s	0.0020449 rad/s	0.0028695 rad/s	0.0028129 rad/s
r	0.018181 rad/s	0.01445 rad/s	0.016837 rad/s	0.01275 rad/s
Waktu simulasi	5.2868 s	7.2903 s	9.4421 s	11.7605 s

Pada Tabel 4.21 menunjukkan perbandingan antara metode EnKF pada lintasan untuk gerakan memutar dan *diving* menunjukkan bahwa membangkitkan 100 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 200, 300 dan 400 ensemble. Dari Tabel terlihat bahwa nilai RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih error posisi yang sedikit. Dengan 100 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 0.12 cm, error posisi Y yaitu 11 cm dan error posisi Z yaitu 9.5 cm. 200 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 6.4 cm, error posisi Y yaitu 13 cm dan error posisi Z yaitu 10 cm. 300 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 1.9 cm, error posisi Y yaitu 13 cm dan error posisi Z yaitu 10 cm. Sedangkan 400 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 2.8 cm, error posisi Y yaitu 12 cm dan error posisi Z yaitu 9.2 cm.

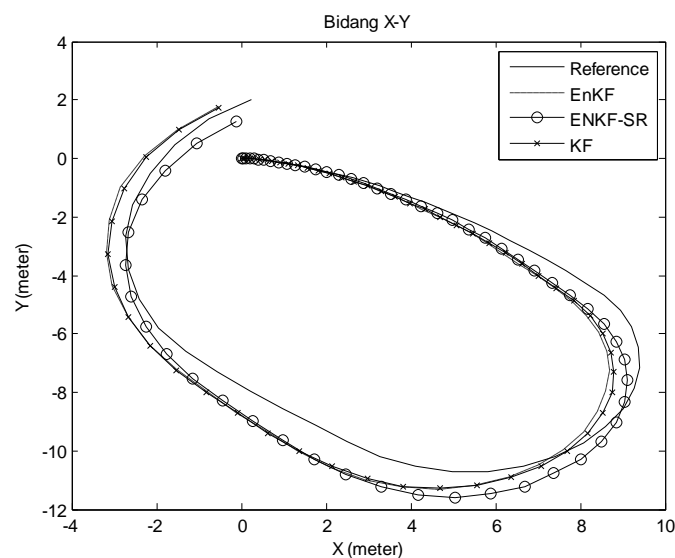
Tabel 4.22. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan memutar dan *diving*

	Lintasan 6 dengan EnKF-SR			
	100	200	300	400
Posisi X	0.0012231 m	0.064321 m	0.019011 m	0.027764 m
Posisi Y	0.065772 m	0.07681 m	0.099115 m	0.086305 m
Posisi Z	0.00022301 m	0.0028753 m	0.0023812 m	0.0051107 m
u	0.0073118 m/s	0,000021031 m/s	0.0033908 m/s	0.00041632 m/s
v	0.0047889 m/s	0.00084391m/s	0.00085586 m/s	0.0031656 m/s
w	0.0069744 m/s	0.0027924 m/s	0.0022694 m/s	0.001586 m/s
p	0.040319 rad/s	0.038079 rad/s	0.040851 rad/s	0.037752 rad/s
q	0.00017925 rad/s	0.0020169 rad/s	0.0023867 rad/s	0.0028047 rad/s
r	0.018072 rad/s	0.012597 rad/s	0.016187 rad/s	0.012008 rad/s
Waktu simulasi	5.2976 s	7.3069 s	9.4531 s	11.7756 s

Pada Tabel 4.22 tampak bahwa dengan perbandingan antara metode EnKF-SR pada lintasan untuk gerakan memutar dan *diving* menunjukkan bahwa membangkitkan 100 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 200, 300 dan 400 ensemble. Dari Tabel terlihat bahwa nilai RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih error posisi yang sedikit. Dengan 100 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 0.12 cm, error posisi Y yaitu 6.5 cm dan error posisi Z yaitu 0.02 cm. 200 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 6.4 cm, error posisi Y yaitu 7.6 cm dan error posisi Z yaitu 0.28 cm. 300 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 1.9 cm, error posisi Y yaitu 9.9 cm dan error posisi Z yaitu 0.23 cm. Sedangkan 400 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 2.7 cm, error posisi Y yaitu 8.6 cm dan error posisi Z yaitu 0.51 cm.

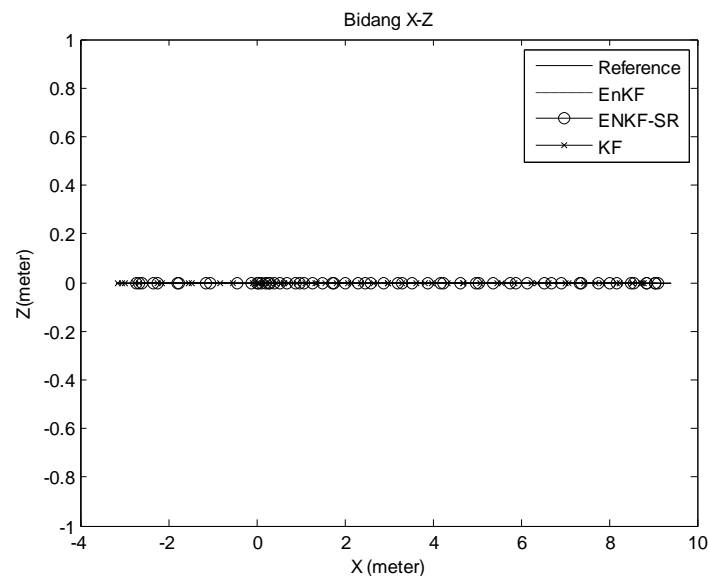
4.7.7 Simulasi untuk Gerakan Memutar Ellips

Pada simulasi ini menggunakan $\Delta t = 0,1$ serta dengan membangkitkan ensemble sejumlah 100, 200, 300 dan 400 ensemble. Titik awal yang diberikan pada setiap lintasan $x(0) = 0, y(0) = 0$, dan $z(0) = 0$. Dengan lintasan pada gerakan memutar ellips, didapatkan hasil estimasi posisi pada bidang XY. XZ dan XYZ dengan menggunakan EnKF, EnKF-SR dan KF serta membangkitkan 300 ensemble pada gambar 4.22–4.24. Selain itu ditampilkan tabel nilai rata – rata RMSE untuk EnKF, EnKF-SR, dan KF di mana EnKF dan EnKF-SR menggunakan 300 ensemble terdapat pada Tabel 4.23.



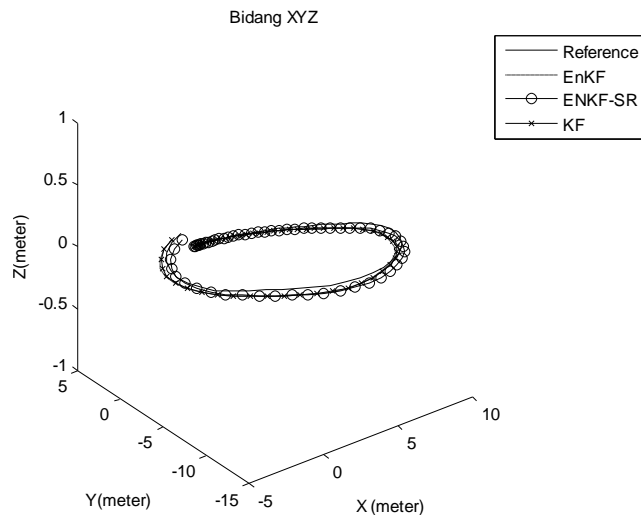
Gambar 4.22. Estimasi posisi pada gerakan memutar ellips pada bidang XY

Pada Gambar 4.22 tampak bahwa AUV mengikuti lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dengan gerakan memutar ellips tanpa *diving*. Ketiga metode tersebut memiliki akurasi yang tinggi dengan tidak melebihi desain kriteria yaitu error posisi maksimal kurang dari 3%. Error yang didapatkan ketika 3% adalah untuk posisi X yaitu 0.42 m, untuk posisi Y yaitu 0.48 m dan untuk posisi Z yaitu 0 m karena hanya gerakan memutar ellips tanpa *diving*. Error yang didapatkan pada simulasi dengan membangkitkan 400 ensemble yang ditunjukkan pada Tabel 4.23 adalah posisi X error terkecilnya yaitu 0.084656 m atau terjadi error posisi 8.4 cm dari target yang dilalui yaitu 14 m atau terjadi error 0.61% dengan metode EnKF-SR, untuk posisi Y yaitu 0.037451 m terjadi error posisi 3.7 cm dari target yang dilalui yaitu 16 m atau terjadi error 0.48% dengan metode EnKF. Error posisi yang kecil pada ketiga metode tersebut disebabkan karena RMSE masing-masing DOF juga kecil.



Gambar 4.23. Estimasi posisi pada gerakan memutar ellips pada bidang XZ

Pada Gambar 4.23 AUV juga mengikuti lintasan dengan melakukan gerakan memutar ellips tanpa *diving* sehingga pada bidang XZ hanya tampak garis lurus saja. AUV dapat mengikuti lintasan baik pada bidang XY ataupun XZ karena RMSE yang didapat untuk gerak dan rotasi sangat kecil sehingga mempengaruhi gerak AUV pada bidang XY dan XZ.



Gambar 4.24. Estimasi posisi pada gerakan memutar ellips pada bidang XYZ

Pada bidang XYZ adalah gabungan lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dan XZ kemudian ditampilkan dalam bidang tiga dimensi. Pada bidang XY, AUV mengikuti lintasan di mana AUV bergerak maju dan *diving* tanpa gerakan belok. Pada tabel 4.23 menunjukkan bahwa ketiga metode tersebut menghasilkan RMSE yang akurat dengan rata-rata 0.3%-0.65%. pengamatan hasil simulasi tampak tingkat akurasi dari ketiga metode diatas dapat disimpulkan bahwa implementasi dari metode-metode tersebut pada suatu platform dapat dilakukan.

Tabel 4.23. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.087656 m	0.084656 m	0.085475 m
Posisi Y	0.037451 m	0.082726 m	0.045545 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m
u	0.020948 m/s	0.0047687 m/s	0.023462 m/s
v	0.0030223 m/s	0.0038582 m/s	0.0032308 m/s
w	0.017993 m/s	0.00028394 m/s	0.013579 m/s
p	0.048071 rad/s	0.04768 rad/s	0.047182 rad/s
q	0.002565 rad/s	0.001367 rad/s	0.0047298 rad/s
r	0.0090159 rad/s	0.0099498 rad/s	0.009982 rad/s
Waktu simulasi	9.9134 s	9.9219 s	9.9063 s

Pada Tabel 4.23 tampak bahwa dengan membangkitkan 300 ensemble EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF untuk gerak translasi dan rotasi sedangkan ketiga metode tersebut tidak jauh berbeda tingkat akurasinya untuk error posisi. Dengan metode EnKF didapatkan error posisi X yaitu 0.087656 m (0.62%), untuk posisi Y

yaitu 0.037451 m (0.23%) dan posisi Z yaitu 0 m. Dengan metode EnKF-SR didapatkan error posisi X yaitu 0.084656 m (0.6%), untuk posisi Y yaitu 0.082726 m (0.517%). Pada metode KF didapatkan error posisi X yaitu 0.085475 m (0.61%), untuk posisi Y yaitu 0.045545 m (0.28%). Metode EnKF SR memiliki error posisi dan gerak translasi serta rotasi yang lebih akurat daripada EnKF dan KF, namun untuk posisi Y, metode EnKF lebih akurat. Ini menunjukkan bahwa error posisi X dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu X yaitu surge dan roll, error posisi Y dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu Y yaitu sway dan yaw. Tabel A1.20 menunjukkan bahwa dengan membangkitkan 200 ensemble metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF baik untuk posisi maupun gerak translasi dan rotasi. Namun pada Tabel A1.19 dan A1.21 dengan membangkitkan 100 dan 400 ensemble menunjukkan bahwa metode KF lebih akurat daripada EnKF dan EnKF-SR.

Tabel 4.24. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan memutar ellips

	Lintasan 7 dengan EnKF			
	EnKF	200	300	400
Posisi X	0.13915 m	0.091976 m	0.087656 m	0.089534 m
Posisi Y	0.088603 m	0.037145 m	0.037451 m	0.047563 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m	0 m
u	0.048296 m/s	0.024797 m/s	0.020948 m/s	0.024935 m/s
v	0.033015 m/s	0.016096 m/s	0.0030223 m/s	0.0028582 m/s
w	0.037959 m/s	0.010674 m/s	0.017993 m/s	0.0010774 m/s
p	0.041861 rad/s	0.044478 rad/s	0.048071 rad/s	0.048707 rad/s
q	0.0016148 rad/s	0.0044003 rad/s	0.002565 rad/s	0.0063531 rad/s
r	0.011288 rad/s	0.0099353 rad/s	0.0090159 rad/s	0.0097223 rad/s
Waktu simulasi	5.8019 s	7.5512 s	9.9134 s	12.3011 s

Pada Tabel 4.24 tampak bahwa dengan perbandingan antara metode EnKF pada lintasan untuk gerakan memutar ellips menunjukkan bahwa membangkitkan 300 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 100, 200 dan 400 ensemble. Dari Tabel terlihat bahwa nilai RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih yang tidak banyak, hanya waktunya untuk 400 ensemble lebih lama karena semakin banyak membangkitkan sejumlah ensemble maka semakin lama waktu simulasinya. Dengan 300 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.7 cm dan error posisi Y yaitu 3.7 cm. 100 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 13 cm dan error posisi Y yaitu 8.8 cm. 200 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 9.1 cm dan error posisi Y yaitu

3.7 cm. sedangkan 400 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.9 cm dan error posisi Y yaitu 4.7 cm.

Tabel 4.25. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan memutar ellips

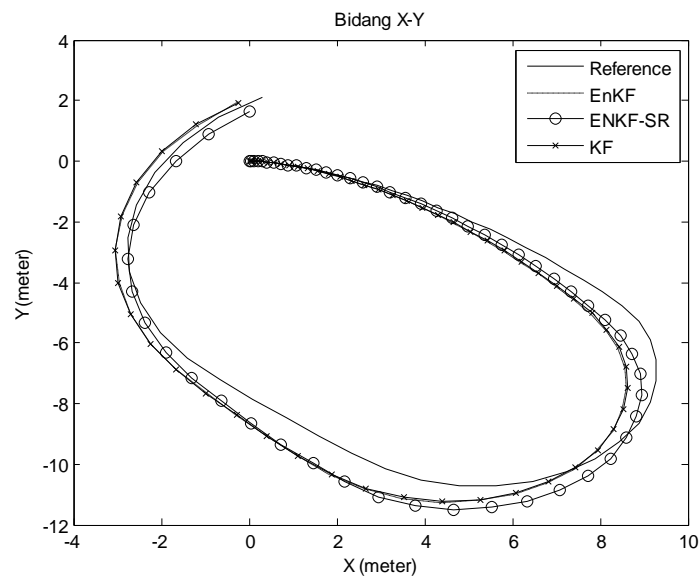
	Lintasan 7 dengan EnKF-SR			
	100	200	300	400
Posisi X	0.11258 m	0.086427 m	0.084656 m	0.086345 m
Posisi Y	0.12737 m	0.030495 m	0.082726 m	0.084592 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m	0 m
u	0.0014336 m/s	0.0017787 m/s	0.0047687 m/s	0.0042989 m/s
v	0.0096696 m/s	0.00074019 m/s	0.0038582 m/s	0.002954 m/s
w	0.0027199 m/s	0.0021252 m/s	0.00028394 m/s	0.00047696 m/s
p	0.041528 rad/s	0.042645 rad/s	0.04768 rad/s	0.047989 rad/s
q	0.0029671 rad/s	0.0058062 rad/s	0.001367 rad/s	0.007839 rad/s
r	0.011196 rad/s	0.0088272 rad/s	0.0099498 rad/s	0.0097475 rad/s
Waktu simulasi	5.8147 s	7.5657 s	9.9219 s	12.3125 s

Pada Tabel 4.25 tampak bahwa dengan perbandingan antara metode EnKF-SR pada lintasan untuk gerakan memutar ellips menunjukkan bahwa membangkitkan 200 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 100, 300 dan 400 ensemble. Dari Tabel terlihat bahwa nilai RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih yang tidak banyak, hanya waktunya untuk 400 ensemble lebih lama karena semakin lama membangkitkan ensemble maka semakin lama waktu simulasinya. Dengan 100 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 11 cm dan error posisi Y yaitu 12 cm. 200 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.6 cm dan error posisi Y yaitu 3 cm. 300 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.4 cm dan error posisi Y yaitu 8.2 cm. Sedangkan 400 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.6 cm dan error posisi Y yaitu 8.4 cm.

4.7.8 Simulasi untuk Gerakan Memutar Ellips dan Diving

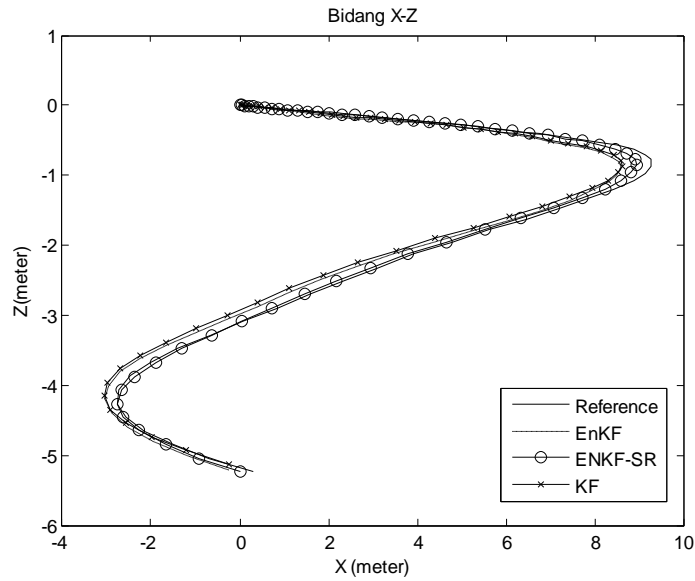
Pada simulasi ini menggunakan $\Delta t = 0,1$ serta dengan membangkitkan ensemble sejumlah 100, 200, 300 dan 400 ensemble. Titik awal yang diberikan pada setiap lintasan $x(0) = 0, y(0) = 0$, dan $z(0) = 0$. Dengan lintasan yang memutar ellips dan *diving* didapatkan hasil estimasi posisi pada bidang XY. XZ dan XYZ dengan menggunakan EnKF, EnKF-SR dan KF serta membangkitkan 300 ensemble pada gambar 4.25 – 4.27. Selain itu ditampilkan tabel nilai rata – rata RMSE untuk EnKF,

EnKF-SR, dan KF di mana EnKF dan EnKF-SR menggunakan 300 ensemble terdapat pada Tabel 4.26.



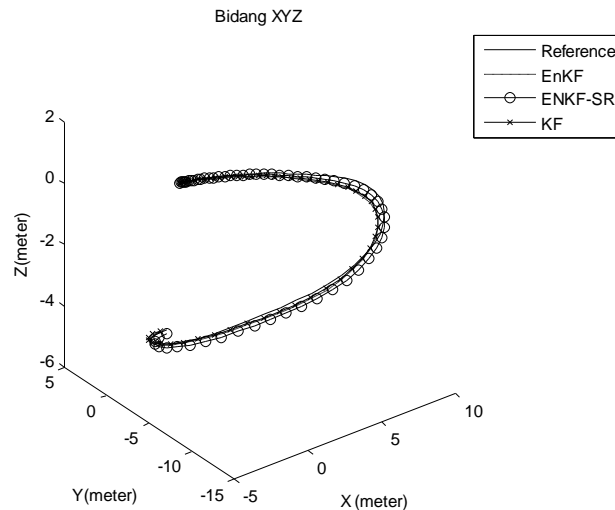
Gambar 4.25. Estimasi posisi pada gerakan memutar ellips dan *diving* pada bidang XY

Pada Gambar 4.25 tampak bahwa AUV melaju mengikuti lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dengan gerakan memutar ellips dan *diving*. Pada bidang XY, AUV mengikuti lintasan di mana AUV langsung berbelok ke kiri pada posisi X 8 m kemudian belok ke kanan dan agak berputar membentuk lintasan mirip ellips. Ketiga metode tersebut diatas memiliki akurasi yang tinggi dengan tidak melebihi desain kriteria yaitu error posisi maksimal kurang dari 3%. Error yang didapatkan ketika 3.0% adalah untuk posisi X yaitu 0.3 m, untuk posisi Y yaitu 0.42 m dan untuk posisi Z yaitu 0.75 m. Error yang dihasilkan pada simulasi dengan membangkitkan 300 ensemble yang ditunjukkan pada Tabel 4.26 adalah posisi X error terkecilnya yaitu 0.09085 m atau terjadi penyimpangan 9 cm dari target yang dilalui 14 m atau terjadi error 0.82%, untuk posisi Y yaitu 0.057398 m terjadi penyimpangan 5.7 cm dari target yang dilalui 16 m atau terjadi error 0.35% dan posisi Z yaitu 0.0003838 m terjadi penyimpangan 0.03 cm dari target yang dilalui 25 m atau terjadi error 0.01%. Error posisi yang kecil pada ketiga metode tersebut disebabkan karena RMSE masing-masing DOF juga kecil.



Gambar 4.26. Estimasi posisi pada gerakan memutar ellips dan *diving* pada bidang XZ

Pada Gambar 4.11 AUV juga mengikuti lintasan dengan melakukan *diving*. AUV dapat mengikuti lintasan baik pada bidang XY ataupun XZ di mana AUV bergerak menyelam sampai kedalaman 7 m setelah itu AUV agak berputar disertai gerakan menyelam sampai kedalaman 10 m kemudian berbelok ke kanan dan menyelam pada kedalaman 22 m. RMSE yang didapat untuk gerak dan rotasi sangat kecil sehingga mempengaruhi gerak AUV pada bidang XY dan XZ



Gambar 4.27. Estimasi posisi pada gerakan memutar ellips dan *diving* pada bidang XYZ

Pada bidang XYZ adalah gabungan lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dan XZ kemudian ditampilkan dalam bidang tiga dimensi. Ketiga metode tersebut sangat akurat, tampak pada Tabel 4.26 dengan metode EnKF-SR, pada posisi X terjadi

error posisi 9 cm dari target yang dilalui yaitu 14 m atau terjadi error 0.87%. Pada posisi Y terjadi error posisi 8.8 cm dari target yang dilalui yaitu 16 m atau terjadi error 0.59%. Posisi Z terjadi error posisi 0.03 cm dari target yang dilalui yaitu 22 m atau terjadi error 0.01%, sedangkan dengan metode EnKF posisi X terjadi penyimpangan 10 cm, posisi Y terjadi penyimpangan 6.6 cm, posisi Z terjadi penyimpangan 6.1 cm dan metode KF pada posisi X terjadi penyimpangan 10 cm, posisi Y terjadi penyimpangan 5.7 cm, posisi Z terjadi penyimpangan 7 cm.

Tabel 4.26. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.10085 m	0.09085 m	0.10021 m
Posisi Y	0.056966 m	0.088279 m	0.057398 m
Posisi Z	0.061858 m	0.0003838 m	0.070142 m
u	0.015574 m/s	0.00095652 m/s	0.020396 m/s
v	0.0001342 m/s	0.002807 m/s	0.00019311 m/s
w	0.014337 m/s	0.0025077 m/s	0.0078589 m/s
p	0.047874 rad/s	0.044902 rad/s	0.045348 rad/s
q	0.0023527 rad/s	0.0016995 rad/s	0.0040647 rad/s
r	0.0084595 rad/s	0.011352 rad/s	0.0086487 rad/s
Waktu simulasi	9.6312 s	9.6406 s	9.6250 s

Pada Tabel 4.26 tampak bahwa dengan membangkitkan 300 ensemble EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF untuk posisi, gerak translasi dan rotasi. Metode EnKF SR memiliki error posisi X dan Z lebih akurat daripada metode EnKF dan KF. Ini menunjukkan bahwa error posisi X dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu X yaitu surge dan roll, sedangkan error posisi Z dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu Z yaitu heave dan pitch. Sedangkan metode KF lebih akurat untuk posisi Y karena error posisi Y dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu Y yaitu sway dan yaw. Tabel A1.22 menunjukkan bahwa dengan membangkitkan 100 ensemble metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF baik untuk posisi X dan Z, namun untuk posisi Y terlihat metode EnKF lebih akurat. Pada Tabel A1.23 dengan membangkitkan 200 ensemble menunjukkan bahwa metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF baik untuk posisi, gerak translasi dan rotasi. Tabel A1.24 menunjukkan bahwa dengan membangkitkan 100 ensemble metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF baik untuk posisi X dan Z, namun untuk posisi Y terlihat bahwa metode KF lebih akurat.

Tabel 4.27. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving*

	Lintasan 8 dengan EnKF			
	100	200	300	400
Posisi X	0.11786 m	0.098797 m	0.10085 m	0.061894 m
Posisi Y	0.011185 m	0.052029 m	0.056966 m	0.076813 m
Posisi Z	0.059106 m	0.10366 m	0.061858 m	0.072952 m
u	0.05294 m/s	0.012145 m/s	0.015574 m/s	0.018269 m/s
v	0.010717 m/s	0.011182 m/s	0.0001342 m/s	0.0020388 m/s
w	0.010994 m/s	0.011193 m/s	0.014337 m/s	0.012442 m/s
p	0.045035 rad/s	0.046227 rad/s	0.047874 rad/s	0.047246 rad/s
q	0.0065931 rad/s	0.0032314 rad/s	0.0023527 rad/s	0.0027325 rad/s
r	0.0082956 rad/s	0.0077665 rad/s	0.0084595 rad/s	0.0073455 rad/s
Waktu simulasi	5.3198 s	7.3643 s	9.6312 s	11.8035 s

Pada Tabel 4.27 tampak bahwa dengan perbandingan antara metode EnKF pada lintasan untuk gerakan memutar ellips dan *diving* menunjukkan bahwa membangkitkan 100 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 200, 300 dan 400 ensemble. Dari Tabel terlihat bahwa nilai RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih error posisi yang sedikit, Dengan 100 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 11 cm, error posisi Y yaitu 1.1 cm dan error posisi Z yaitu 5.9 cm. 200 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 9.8 cm, error posisi Y yaitu 5.2 cm dan error posisi Z yaitu 10 cm. 300 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 10 cm, error posisi Y yaitu 6.6 cm dan error posisi Z yaitu 6.1 cm. Sedangkan 400 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 6.1 cm, error posisi Y yaitu 7.6 cm dan error posisi Z yaitu 7.2 cm.

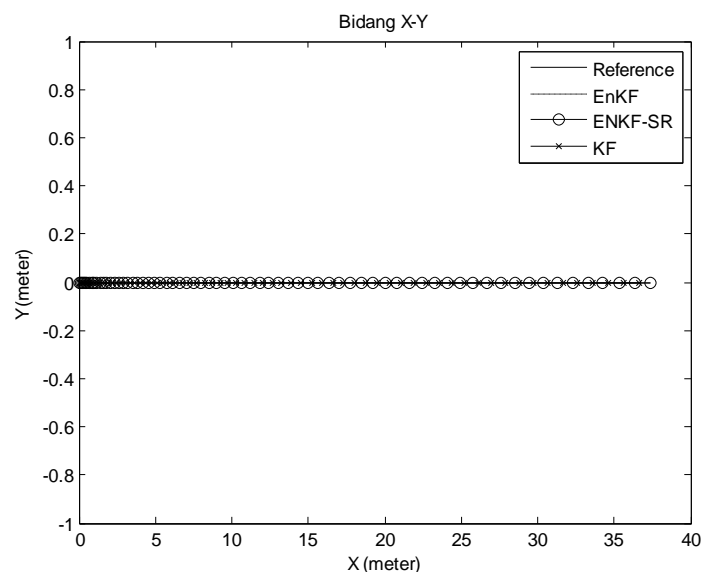
Tabel 4.28. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving*

	Lintasan 8 dengan EnKF-SR			
	100	200	300	400
Posisi X	0.09982 m	0.095642 m	0.09085 m	0.061765 m
Posisi Y	0.10662 m	0.051691 m	0.088279 m	0.10029 m
Posisi Z	0.0014701 m	0.0026281 m	0.0003838 m	0.001977 m
u	0.011583 m/s	0.0010079 m/s	0.00095652 m/s	0.0032417 m/s
v	0.012993 m/s	0.0027767 m/s	0.002807 m/s	0.0059725 m/s
w	0.0013179 m/s	0.0029869 m/s	0.0025077 m/s	0.0042058 m/s
p	0.043942 rad/s	0.045292 rad/s	0.044902 rad/s	0.045062 rad/s
q	0.0053329 rad/s	0.0030821 rad/s	0.0016995 rad/s	0.002047 rad/s
r	0.0096993 rad/s	0.0065695 rad/s	0.011352 rad/s	0.0085426 rad/s
Waktu simulasi	5.3286 s	7.3704	9.6406 s	11.8114 s

Pada Tabel 4.28 tampak bahwa dengan perbandingan antara metode EnKF-SR pada lintasan untuk gerakan memutar ellips dan *diving* menunjukkan bahwa membangkitkan 300 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 200, 300 dan 400 ensemble. Dari Tabel terlihat bahwa nilai RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih error posisi yang sedikit, Dengan 100 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 9.9 cm, error posisi Y yaitu 10 cm dan error posisi Z yaitu 0.14 cm. 200 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 9.5 cm, error posisi Y yaitu 5.1 cm dan error posisi Z yaitu 0.26 cm. 300 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 9 cm, error posisi Y yaitu 8.8 cm dan error posisi Z yaitu 0.03 cm. Sedangkan 400 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 6.1 cm, error posisi Y yaitu 10 cm dan error posisi Z yaitu 0.19 cm.

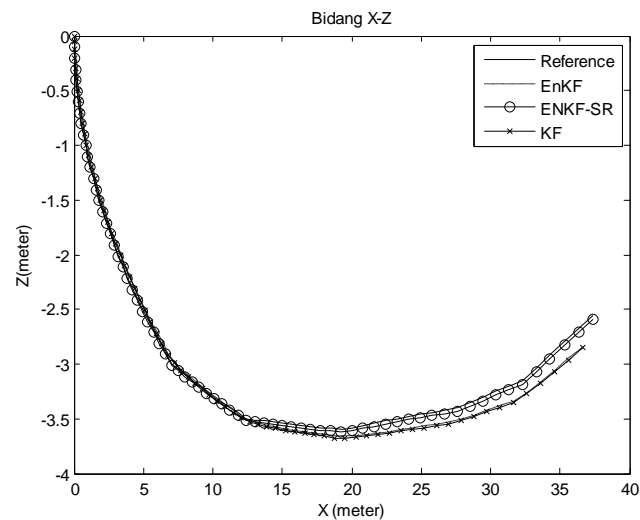
4.7.9 Simulasi untuk Gerakan Diving dan Emerging

Pada simulasi ini menggunakan $\Delta t = 0,1$ serta dengan membangkitkan ensemble sejumlah 100, 200, 300 dan 400 ensemble. Titik awal yang diberikan pada setiap lintasan $x(0) = 0, y(0) = 0$, dan $z(0) = 0$. Dengan lintasan pada gerakan *diving* dan *emerging*, didapatkan hasil estimasi posisi pada bidang XY. XZ dan XYZ dengan menggunakan EnKF, EnKF-SR dan KF serta membangkitkan 300 ensemble pada Gambar 4.28–4.30. Selain itu ditampilkan tabel nilai RMSE untuk EnKF, EnKF-SR, dan KF di mana EnKF dan EnKF-SR menggunakan 300 ensemble terdapat pada Tabel 4.29.



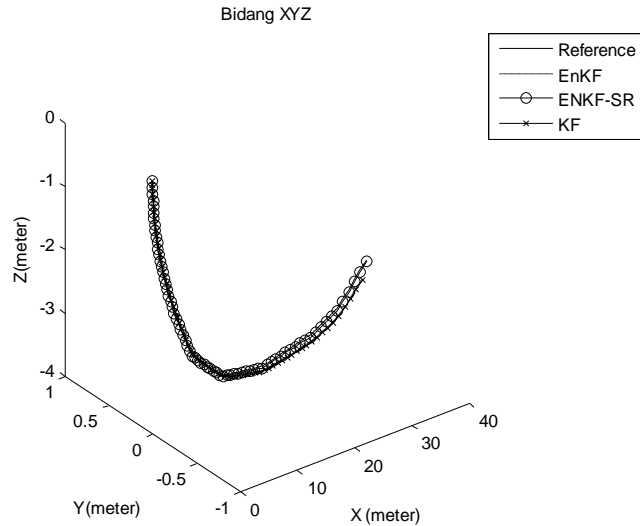
Gambar 4.28. Estimasi posisi pada gerakan *diving* dan *emerging* pada bidang XY

Pada Gambar 4.28 tampak bahwa AUV mengikuti lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dengan gerakan *diving* dan *emerging*. Ketiga metode tersebut memiliki akurasi yang tinggi dengan tidak melebihi desain kriteria yaitu error posisi maksimal kurang dari 3%. Error yang didapatkan ketika 3% adalah untuk posisi X yaitu 0.84 m, untuk posisi Z yaitu 0.135 m dan untuk posisi Y yaitu 0 m karena hanya gerakan *diving* dan *emerging* tanpa belok. Error yang didapatkan pada simulasi dengan membangkitkan 400 ensemble yang ditunjukkan pada Tabel 4.29 adalah posisi X error terkecilnya yaitu 0.08113 m atau terjadi error posisi 8.1 cm dari target yang dilalui yaitu 28 m atau terjadi error 0.306% dengan metode EnKF-SR, untuk posisi Z yaitu 0.0012287 m terjadi error posisi 0.12 cm dari target yang dilalui yaitu 4.5 m atau terjadi error 0.017% dengan metode EnKF-SR. Error posisi yang kecil pada ketiga metode tersebut disebabkan karena RMSE masing-masing DOF juga kecil.



Gambar 4.29. Estimasi posisi pada gerakan *diving* dan *emerging* pada bidang XZ

Pada Gambar 4.29 AUV juga mengikuti lintasan dengan melakukan *diving*. AUV dapat mengikuti lintasan baik pada bidang XY ataupun XZ karena RMSE yang didapat untuk gerak dan rotasi sangat kecil sehingga mempengaruhi gerak AUV pada bidang XY dan XZ. RMSE gerak translasi dan rotasi dipengaruhi oleh perhitungan koefisien hidrodinamika. Kesesuaian prosedur dalam penentuan nilai koefisien hidrodinamika dapat mengurangi error penyimpangan posisi.



Gambar 4.30. Estimasi posisi pada gerakan *diving* dan *emerging* pada bidang XYZ

Pada bidang XYZ adalah gabungan lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dan XZ kemudian ditampilkan dalam bidang tiga dimensi. Pada bidang XYZ, AUV mengikuti lintasan di mana AUV bergerak maju dan *diving* kemudian naik ke atas (*emerging*) tanpa gerakan belok. Ketiga metode tersebut sangat akurat, tampak pada tabel 4.29 dengan metode EnKF-SR, pada posisi X terjadi error posisi 8.11 cm dari target yang dilalui yaitu 28 m atau terjadi error 0.316% dan posisi Z terjadi error posisi 0.12 cm dari target yang dilalui yaitu 4.5 m atau terjadi error 0.017%, sedangkan dengan metode EnKF posisi X terjadi penyimpangan 8.12 cm, posisi Z terjadi penyimpangan 2.85 cm dan metode KF pada posisi X terjadi penyimpangan 8.21 cm, posisi Z terjadi penyimpangan 2.89 cm.

Tabel 4.29. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.08129 m	0.08113 m	0.082182 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0.028506 m	0.0012287 m	0.028912 m
u	0.019577 m/s	0.0011039 m/s	0.019781 m/s
v	0.0038952 m/s	0.00076356 m/s	0.0042297 m/s
w	0.0045796 m/s	0.0010807 m/s	0.0050125 m/s
p	0.0007266 rad/s	0.0007197 rad/s	0.00079916 rad/s
q	0.0056279 rad/s	0.0053294 rad/s	0.0057488 rad/s
r	0.0031758 rad/s	0.0032326 rad/s	0.0027558 rad/s
Waktu simulasi	9.5114 s	9.5178 s	9.5000 s

Pada Tabel 4.29 tampak bahwa dengan membangkitkan 300 ensemble EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF untuk posisi, gerak translasi dan rotasi. Metode EnKF SR memiliki error posisi dan gerak translasi serta rotasi yang lebih akurat daripada EnKF dan KF. Ini menunjukkan bahwa error posisi X dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu X yaitu surge dan roll, sedangkan error posisi Z dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi pada sumbu Z yaitu heave dan pitch. Tabel A1.25 menunjukkan bahwa dengan membangkitkan 100 ensemble metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF baik untuk posisi maupun gerak translasi dan rotasi. Pada Tabel A1.26 dan A1.27 dengan membangkitkan 200 dan 400 ensemble menunjukkan bahwa metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF.

Tabel 4.30. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging*

	Lintasan 9 dengan EnKF			
	100	200	300	400
Posisi X	0.088665 m	0.096864 m	0.08129 m	0.081576 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0.032503 m	0.029673 m	0.028506 m	0.023414 m
u	0.015837 m/s	0.017363 m/s	0.019577 m/s	0.017651 m/s
v	0.0054008 m/s	0.0050888 m/s	0.0038952 m/s	0.00015368 m/s
w	0.002783 m/s	0.0074992 m/s	0.0045796 m/s	0.0073299 m/s
p	0.00075109rad/s	0.00099982rad/s	0.0007266 rad/s	0.00046161rad/s
q	0.005186 rad/s	0.0049291 rad/s	0.0056279 rad/s	0.0054937 rad/s
r	0.0028914 rad/s	0.0028395 rad/s	0.0031758 rad/s	0.0030184 rad/s
Waktu simulasi	5.2645 s	7.3281 s	9.5114 s	11.7925 s

Pada Tabel 4.30 tampak bahwa dengan perbandingan antara metode EnKF pada lintasan untuk gerakan *diving* dan *emerging* menunjukkan bahwa membangkitkan 400 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 100, 200 dan 300 ensemble. Dari Tabel terlihat bahwa nilai RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih error posisi yang sedikit, hanya waktu simulasi untuk 400 ensemble lebih lama karena semakin lama membangkitkan ensemble maka semakin lama waktu simulasinya. Dengan 100 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.8 cm dan error posisi Z yaitu 3.2 cm. 200 ensemble memiliki error posisi X yaitu 9.6 cm dan error posisi Z yaitu 2.9 cm. 300 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.12 cm dan error posisi Z yaitu 2.8 cm. Sedangkan 400 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.15 cm dan error posisi Z yaitu 2.3 cm.

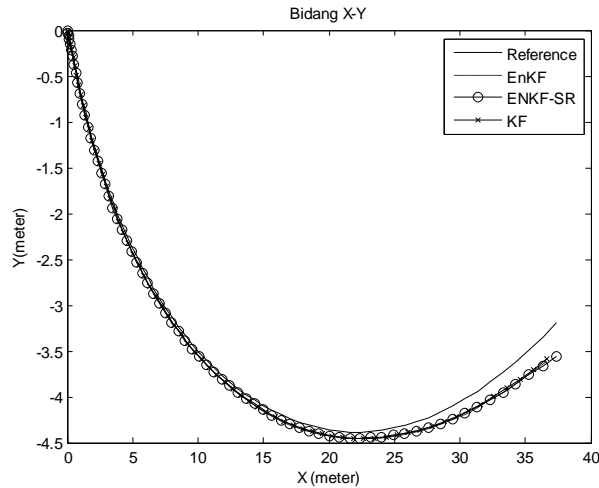
Tabel 4.31. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging*

	Lintasan 9 dengan EnKF-SR			
	100	200	300	400
Posisi X	0.085754 m	0.09025 m	0.08113 m	0.08024 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0.00080876 m	0.0029538 m	0.0012287 m	0.00095117 m
u	0.00018716 m/s	0.00022272 m/s	0.0011039 m/s	0.00062986 m/s
v	0.00017894 m/s	0.00084333 m/s	0.00076356 m/s	0.0017059 m/s
w	0.00025892 m/s	0.00080289 m/s	0.0010807 m/s	0.000027984 m/s
p	0.0004123 rad/s	0.00090556 rad/s	0.0007197 rad/s	0.00045067 rad/s
q	0.0051557 rad/s	0.0045978 rad/s	0.0053294 rad/s	0.0052026 rad/s
r	0.0031475 rad/s	0.0029408 rad/s	0.0032326 rad/s	0.0032469 rad/s
Waktu simulasi	5.342 s	7.3541 s	9.5178 s	11.8021 s

Pada Tabel 4.30 tampak bahwa dengan perbandingan antara metode EnKF pada lintasan untuk gerakan *diving* dan *emerging* menunjukkan bahwa membangkitkan 400 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 100, 200 dan 300 ensemble. Dari Tabel terlihat bahwa nilai RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih error posisi yang sedikit, hanya waktu simulasi untuk 400 ensemble lebih lama karena semakin lama membangkitkan ensemble maka semakin lama waktu simulasinya. Dengan 100 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.8 cm dan error posisi Z yaitu 3.2 cm. 200 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 9.6 cm dan error posisi Z yaitu 2.9 cm. 300 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.12 cm dan error posisi Z yaitu 2.8 cm. Sedangkan 400 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.15 cm dan error posisi Z yaitu 2.3 cm.

4.7.10 Simulasi untuk Gerakan Diving, Emerging dan Belok

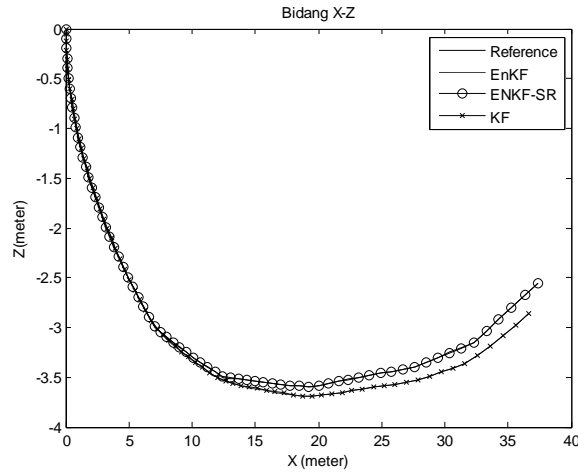
Pada simulasi ini menggunakan $\Delta t = 0,1$ serta dengan membangkitkan ensemble sejumlah 100, 200, 300 dan 400 ensemble. titik awal yang diberikan pada setiap lintasan $x(0) = 0, y(0) = 0, \text{ dan } z(0) = 0$. Dengan lintasan pada gerakan *diving*, *emerging* dan belok, didapatkan hasil estimasi posisi pada bidang XY. XZ dan XYZ dengan menggunakan EnKF, EnKF-SR dan KF serta membangkitkan 300 ensemble pada gambar 4.31–4.33. Selain itu ditampilkan tabel nilai RMSE untuk EnKF, EnKF-SR, dan KF di mana EnKF dan EnKF-SR menggunakan 300 ensemble terdapat pada Tabel 4.32.



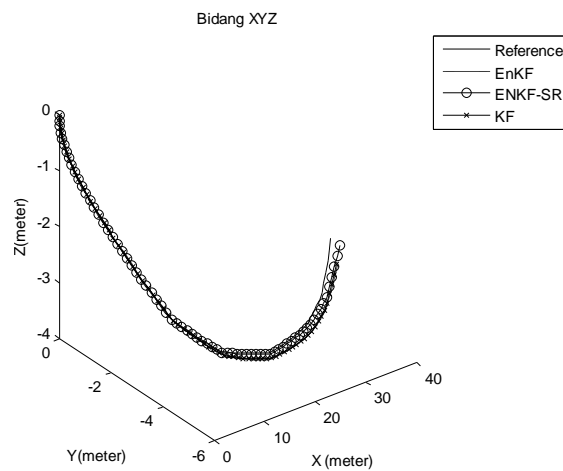
Gambar 4.31. Estimasi posisi pada gerakan *diving*, *emerging* dan belok pada bidang XY

Pada Gambar 4.31 tampak bahwa AUV bergerak mengikuti lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dengan gerakan maju kemudian *diving* dan *emerging* disertai belok. Ketiga metode tersebut memiliki akurasi yang tinggi dengan tidak melebihi desain kriteria yaitu error posisi maksimal kurang dari 3%. Error yang didapatkan ketika 3 % adalah untuk posisi X yaitu 0.84 m, untuk posisi Y yaitu 0.15 m dan untuk posisi Z yaitu 0.135 m. Error yang didapatkan pada simulasi dengan membangkitkan 300 ensemble yang ditunjukkan pada Tabel 4.32 adalah posisi X error terkecilnya yaitu 0.081543 m atau terjadi error posisi 8.1 cm dari target yang dilalui yaitu 28 m atau terjadi error 0,288% dengan metode EnKF-SR, untuk posisi Y yaitu 0.015477 m terjadi error posisi 1.5 cm dari target yang dilalui yaitu 5 m atau terjadi error 0.309% dengan metode EnKF-SR. untuk posisi Z yaitu 0.00027214 m terjadi error posisi 0.02 cm dari target yang dilalui yaitu 4.5 m atau terjadi error 0.006% dengan metode EnKF-SR. Error posisi yang kecil pada ketiga metode tersebut disebabkan karena RMSE masing-masing DOF juga kecil.

Pada Gambar 4.32 AUV juga mengikuti lintasan dengan melakukan *diving* kemudian *emerging* disertai belok. AUV dapat mengikuti lintasan baik pada bidang XY ataupun XZ karena RMSE yang didapat untuk gerak dan rotasi sangat kecil sehingga mempengaruhi gerak AUV pada bidang XY dan XZ. RMSE gerak translasi dan rotasi dipengaruhi oleh perhitungan koefisien hidrodinamika. Kesesuaian prosedur dalam penentuan nilai koefisien hidrodinamika merupakan salah satu factor yang dapat mengurangi error penyimpangan posisi.



Gambar 4.32. Estimasi posisi pada gerakan *diving*, *emerging* dan belok pada bidang XZ



Gambar 4.33. Estimasi posisi pada gerakan *diving*, *emerging* dan belok pada bidang XY

Pada bidang XYZ adalah gabungan lintasan yang telah dibuat pada bidang XY dan XZ. AUV mengikuti lintasan di mana AUV bergerak *diving*, *emerging* kemudian belok. Ketiga metode tersebut sangat akurat yang tampak pada Tabel 4.32. Dengan metode EnKF-SR, pada posisi X terjadi penyimpangan 8.1 cm dari target yang dilalui yaitu 28 m atau terjadi error 0.288%, posisi Y terjadi penyimpangan 1.5 cm dari target yang dilalui yaitu 5 m, posisi Z terjadi error posisi 0.02 cm dari target yang dilalui yaitu 7 m atau terjadi error 0.006%, sedangkan dengan metode EnKF posisi X terjadi penyimpangan 8.16 cm, posisi Y terjadi penyimpangan 2.04 cm, posisi Z terjadi penyimpangan 2.12 cm dan metode KF pada posisi X terjadi penyimpangan 8.18 cm, posisi Y terjadi penyimpangan 2.43 cm, posisi Z terjadi penyimpangan 2.46 cm.

Tabel 4.32. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF pada gerakan *diving*, *emerging* dan belok dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.081629 m	0.081543 m	0.081888 m
Posisi Y	0.02043 m	0.015477 m	0.024326 m
Posisi Z	0.021238 m	0.00027214 m	0.024618 m
u	0.016344 m/s	0.00041528 m/s	0.017714 m/s
v	0.00084405 m/s	0.00032958 m/s	0.0024477 m/s
w	0.0088313 m/s	0.0018121 m/s	0.0071959 m/s
p	0.00035229 rad/s	0.0001419 rad/s	0.00054289 rad/s
q	0.0051192 rad/s	0.0050567 rad/s	0.0051675 rad/s
r	0.002365 rad/s	0.0019399 rad/s	0.0025435 rad/s
Waktu simulasi	9.7656 s	9.7987 s	9.7813 s

Pada Tabel 4.32 tampak bahwa dengan membangkitkan 300 ensemble EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF untuk gerak translasi, rotasi dan posisi. Dengan metode EnKF didapatkan penyimpangan posisi X yaitu 0.081629 m atau terjadi error 0.291%, untuk posisi Y yaitu 0.02443 m atau terjadi error 0.488 % dan posisi Z yaitu 0.021238 m atau terjadi error 0.472%. Dengan menggunakan metode EnKF-SR didapatkan error posisi X yaitu 0.081543 m (0.288%), untuk posisi Y yaitu 0.015477 m (0.309%) dan posisi Z yaitu 0.00027214 m (0.006%). Pada metode KF didapatkan error posisi X yaitu 0.081888 m (0.292%), untuk posisi Y yaitu 0.020326 m (0.406%) dan posisi Z yaitu 0.024618 m (0.547%). Tabel A1.28 – A1.30. Tabel A1.29 menunjukkan bahwa dengan membangkitkan 200 ensemble metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF baik untuk posisi maupun gerak translasi dan rotasi. Namun untuk posisi Y, metode EnKF lebih akurat daripada EnKF-SR dan KF karena dipengaruhi oleh gerak sway dan yaw yang juga memiliki nilai RMSE lebih kecil daripada EnKF-SR dan KF. Pada Tabel A1.28 dan A1.30 dengan membangkitkan 100 dan 400 ensemble menunjukkan bahwa metode EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF.

Pada Tabel 4.33 tampak bahwa dengan perbandingan antara metode EnKF pada lintasan untuk gerakan *diving*, *emerging* dan belok menunjukkan bahwa membangkitkan 300 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 100, 200 dan 400 ensemble. Dari Tabel terlihat bahwa nilai RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih error posisi yang sedikit. Dengan 300 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.16 cm, error posisi Y yaitu 2 cm dan error posisi Z yaitu 2.12 cm. 100

ensemble mempunyai error posisi X yaitu 11.4 cm, error posisi Y yaitu 2.1 cm dan error posisi Z yaitu 3 cm. 200 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.5 cm, error posisi Y yaitu 0.58 cm dan error posisi Z yaitu 3.3 cm. Sedangkan 400 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.4 cm, error posisi Y yaitu 1.9 cm dan error posisi Z yaitu 2.4 cm.

Tabel 4.33. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan *diving*, *emerging* dan belok

	Lintasan 10 dengan EnKF			
	100	200	300	400
Posisi X	0.11416 m	0.08557 m	0.081629 m	0.084796 m
Posisi Y	0.021905 m	0.0058302 m	0.02043 m	0.019127 m
Posisi Z	0.03065 m	0.033882 m	0.021238 m	0.024307 m
u	0.017738 m/s	0.016925 m/s	0.016344 m/s	0.018913 m/s
v	0.005794 m/s	0.0023743 m/s	0.00084405 m/s	0.005284 m/s
w	0.013378 m/s	0.0097233 m/s	0.0088313 m/s	0.0052475 m/s
p	0.0003257 rad/s	0.00069018 rad/s	0.00035229 rad/s	0.00083552 rad/s
q	0.0051334 rad/s	0.0053848 rad/s	0.0051192 rad/s	0.0051604 rad/s
r	0.0032202 rad/s	0.0022973 rad/s	0.002365 rad/s	0.0030122 rad/s
Waktu simulasi	5.2986 s	7.3658 s	9.7656 s	12.5237 s

Tabel 4.34. Perbandingan nilai RMSE pada metode EnKF-SR dengan membangkitkan 100, 200, 300 dan 400 ensemble berdasarkan gerakan *diving*, *emerging* dan belok

	Lintasan 10 dengan EnKF-SR			
	EnKF	200	300	400
Posisi X	0.0985 m	0.08354 m	0.081543 m	0.082796 m
Posisi Y	0.017939 m	0.012912 m	0.015477 m	0.016755 m
Posisi Z	0.0021883 m	0.00093288 m	0.00027214 m	0.00092496 m
u	0.0011475 m/s	0.0014906 m/s	0.00041528 m/s	0.000066838 m/s
v	0.0006709 m/s	0.00285475 m/s	0.00032958 m/s	0.0013083 m/s
w	0.00011926 m/s	0.002032 m/s	0.0018121 m/s	0.0001266 m/s
p	0.00016015 rad/s	0.00046831 rad/s	0.0001419 rad/s	0.0005804 rad/s
q	0.005017 rad/s	0.0051148 rad/s	0.0050567 rad/s	0.0047075 rad/s
r	0.0028384 rad/s	0.0023121 rad/s	0.0019399 rad/s	0.0026959 rad/s
Waktu simulasi	5.3125 s	7.3781 s	9.7987 s	12.5313 s

Pada Tabel 4.34 tampak bahwa dengan perbandingan antara metode EnKF-SR pada lintasan untuk gerakan *diving*, *emerging* dan belok menunjukkan bahwa membangkitkan 300 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 100, 200 dan 400 ensemble. Dari Tabel terlihat bahwa nilai RMSE antara 100, 200, 300 dan 400 mempunyai selisih error posisi yang sedikit. Dengan 300 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.15 cm, error posisi Y yaitu 1.54 cm dan error posisi Z yaitu 0.02 cm.

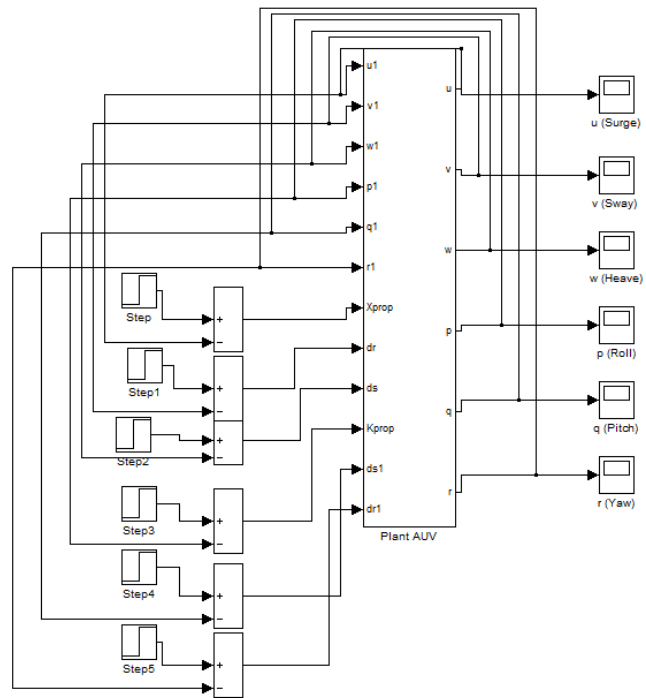
100 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 9.8 cm, error posisi Y yaitu 1.7 cm dan error posisi Z yaitu 0.21 cm. 200 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.3 cm, error posisi Y yaitu 1.2 cm dan error posisi Z yaitu 0.093 cm. Sedangkan 400 ensemble mempunyai error posisi X yaitu 8.2 cm, error posisi Y yaitu 1.6 cm dan error posisi Z yaitu 0.092 cm.

Secara keseluruhan dari kesepuluh lintasan dapat disimpulkan bahwa metode EnKF-SR lebih akurat daripada metode EnKF dan KF. Nilai RMSE dengan 100, 200 dan 400 terdapat pada halaman lampiran yang juga menunjukkan bahwa EnKF-SR lebih akurat daripada EnKF dan KF. Metode EnKF-SR dengan membangkitkan 300 ensemble lebih baik daripada membangkitkan 100, 200 dan 400 ensemble yang tampak pada tabel diatas. Dalam hal ini sistem navigasi dan panduan digunakan sebagai respon posisi untuk menunjukkan kestabilan posisi. Berikutnya akan dibahas tentang kendali gerak yang digunakan untuk mengendalikan kecepatan untuk menjaga kestabilan gerak AUV.

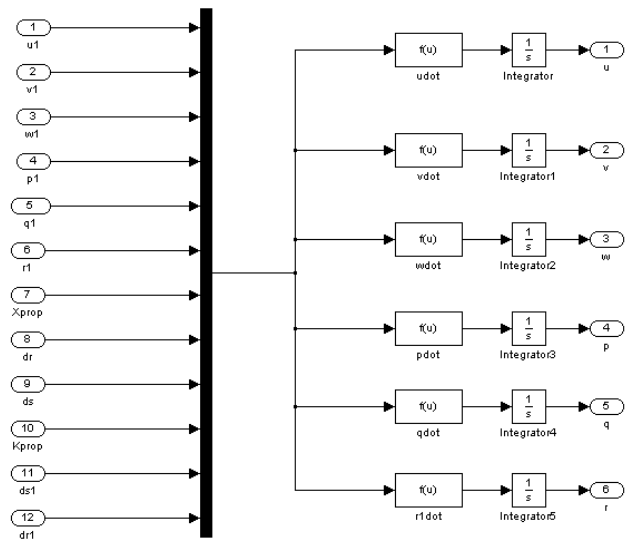
4.8 PERANCANGAN SISTEM KENDALI

Pada sub-bab ini dilakukan perancangan sistem kendali pada model linier 6-DOF. Sebagai perbandingan hasil simulasi, maka dirancang tiga sistem kendali pada model linier yaitu PID, SMC dan SPID. Sebelum dilakukan perancangan sistem kendali, terlebih dahulu mengimplementasikan model linier 6-DOF tanpa sistem kendali ke dalam blok diagram simulink Matlab yang tampak pada gambar 4.34.

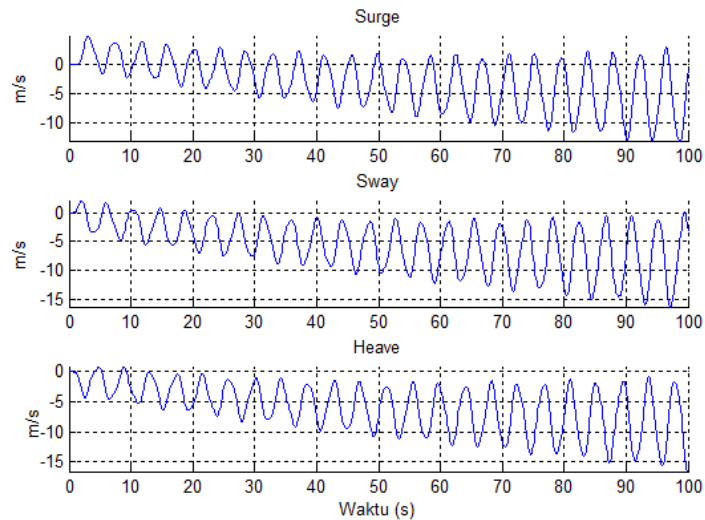
Pada Gambar 4.34 menunjukkan diagram blok AUV yang terdiri dari 6-DOF yaitu surge, sway, heave, roll, pitch dan yaw. Di mana blok diagram tersebut tanpa sistem kendali. Sedangkan Gambar 4.35 menunjukkan sistem dari AUV yang terdapat fungsi pembentuk Surge, Sway, heave, roll, pitch dan yaw. Setelah dibentuk blok diagram maka didapatkan hasil simulasi sistem AUV tanpa sistem kendali tampak pada Gambar 4.36 dan 4.37



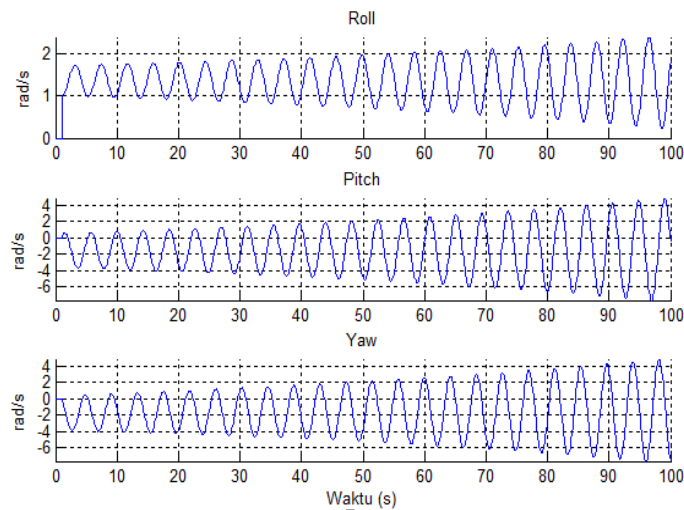
Gambar 4.34. Diagram blok AUV



Gambar 4.35. Diagram blok subsistem AUV



Gambar 4.36. Respon gerak translasi AUV tanpa sistem kendali

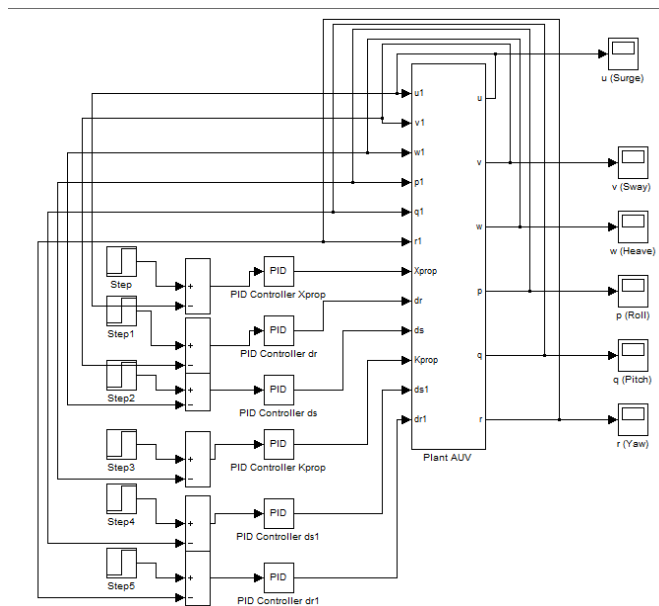


Gambar 4.37. Respon gerak rotasi AUV tanpa sistem kendali

Pada Gambar 4.36 dan 4.37 bahwa respon untuk gerak translasi dan rotasi AUV tanpa sistem kendali terdapat drifting atau simpangan yang semakin membesar sampai kapanpun. Dengan kata lain, error tidak akan menuju ke nol sampai kapanpun sehingga memerlukan sistem kendali agar gerakannya stabil. Dalam Disertasi ini menggunakan sistem kendali PID, SMC dan Sliding PID (SPID).

4.8.1 Perancangan sistem kendali PID pada Model Linier 6-DOF

Perancangan sistem kendali PID ini dilakukan untuk mengatasi ketidakstabilan gerak translasi dan rotasi pada AUV. Berikut adalah blok diagram AUV dengan menggunakan sistem kendali PID pada Gambar 4.38.



Gambar 4.38. Blok diagram AUV dengan sistem kendali PID

Setelah dibentuk blok diagram maka didapatkan hasil simulasi sistem AUV dengan sistem kendali PID. Metode yang digunakan untuk penentuan nilai *proportional*, *integral* dan *derivative* adalah metode *trial and error*. Dalam simulasi PID dibandingkan antara PID default dan identik di mana nilai *proportional*, *integral* dan *derivative* sama dengan nilai yang digunakan oleh SPID. Berikut adalah Nilai *proportional*, *integral* dan *derivative* dari PID default dan identik :

Tabel 4.35. Nilai *proportional*, *integral* dan *derivative* dari PID default dan identik

PID default				PID identik		
	Proportional	Integral	Derivatif	Proportional	Integral	Derivatif
Surge	10	1.5	2	2.1	0	0
Sway	1	10	2	2.01	0	0
Heave	3	1.5	2	2.01	0	0
Roll	2	1	0.01	2.01	0	0
Pitch	2	1	0.01	2.1	0	0
Yaw	2	1	0.01	2.1	0	0

4.8.2 Perancangan Sistem Kendali SMC dan SPID pada Model Linier 6-DOF

Perancangan sistem kendali SMC pada model linier 6-DOF akan dibentuk persamaan kendali untuk surge, sway, heave, roll, pitch dan yaw. Setelah didapatkan

persamaan sistem kendali tersebut kemudian dihubungkan ke model linier 6-DOF sehingga diharapkan sistem stabil.

a. Sistem Kendali Surge dengan SMC

Dari persamaan (4.18) diperluas menjadi persamaan (4.99) sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aa_1 & bb_1 & cc_1 & dd_1 & ee_1 & gg_1 \\ aa_2 & bb_2 & cc_2 & dd_2 & ee_2 & gg_2 \\ aa_3 & bb_3 & cc_3 & dd_3 & ee_3 & gg_3 \\ aa_4 & bb_4 & cc_4 & dd_4 & ee_4 & gg_4 \\ aa_5 & bb_5 & cc_5 & dd_5 & ee_5 & gg_5 \\ aa_6 & bb_6 & cc_6 & dd_6 & ee_6 & gg_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} AA_1 & BB_1 & CC_1 & DD_1 & EE_1 & GG_1 \\ AA_2 & BB_2 & CC_2 & DD_2 & EE_2 & GG_2 \\ AA_3 & BB_3 & CC_3 & DD_3 & EE_3 & GG_3 \\ AA_4 & BB_4 & CC_4 & DD_4 & EE_4 & GG_4 \\ AA_5 & BB_5 & CC_5 & DD_5 & EE_5 & GG_5 \\ AA_6 & BB_6 & CC_6 & DD_6 & EE_6 & GG_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{prop} \\ \delta_{r_1} \\ \delta_{s_1} \\ K_{prop} \\ \delta_{s_2} \\ \delta_{r_2} \end{bmatrix} \quad (4.99)$$

Dari persamaan (4.99) didapatkan *state* dari surge yang dapat dituliskan

$$\begin{aligned} \dot{u} = & aa_1 u + bb_1 v + cc_1 w + dd_1 p + ee_1 q + gg_1 r + AA_1 X_{prop} \\ & + BB_1 \delta_{r_1} + CC_1 \delta_{s_1} + DD_1 K_{prop} + EE_1 \delta_{s_2} + GG_1 \delta_{r_2} \end{aligned} \quad (4.100)$$

Untuk mencari kendali dari surge terlebih dahulu ditentukan *tracking error* dari surge sebagai berikut:

$$\tilde{u} = u - u_d \quad u_d = \text{konstan}$$

karena sistem berorde 1 maka dibentuk fungsi *switching* sebagai berikut :

$$S(u, t) = \left(\frac{d}{dt} \right)^{n-1} \tilde{u} \quad \text{dengan } n=1$$

$$S(u, t) = \left(\frac{d}{dt} \right)^{1-1} \tilde{u}$$

$$S(u, t) = \tilde{u} = u - u_d$$

sedangkan turunan dari S adalah :

$$\dot{S}(u, t) = \dot{u} - \dot{u}_d \quad (4.101)$$

karena $u_d = \text{konstan}$ maka $\dot{u}_d = 0$

dengan mensubstitusikan persamaan (4.100) ke (4.101), menjadi:

$$\begin{aligned} \dot{S}(u, t) = & aa_1 u + bb_1 v + cc_1 w + dd_1 p + ee_1 q + gg_1 r + AA_1 X_{prop} \\ & + BB_1 \delta_{r_1} + CC_1 \delta_{s_1} + DD_1 K_{prop} + EE_1 \delta_{s_2} + GG_1 \delta_{r_2} \end{aligned} \quad (4.102)$$

Selanjutnya ditentukan nilai \hat{X}_{prop} dari persamaan (4.102) dengan nilai $\dot{S} = 0$

$$\begin{aligned} & aa_1 u + bb_1 v + cc_1 w + dd_1 p + ee_1 q + gg_1 r + AA_1 X_{prop} \\ & + BB_1 \delta_{r_1} + CC_1 \delta_{s_1} + DD_1 K_{prop} + EE_1 \delta_{s_2} + GG_1 \delta_{r_2} = 0 \end{aligned} \quad (4.103)$$

sehingga didapat \hat{X}_{prop} adalah

$$\begin{aligned} \hat{X}_{prop} = & - \left(\frac{aa_1 u + bb_1 v + cc_1 w + dd_1 p + ee_1 q + gg_1 r}{AA_1} \right) - \dots \\ & \left(\frac{BB_1 \delta_{r_1} + CC_1 \delta_{s_1} + DD_1 K_{prop} + EE_1 \delta_{s_2} + GG_1 \delta_{r_2}}{AA_1} \right) \end{aligned} \quad (4.104)$$

Berdasarkan *control law* yang memenuhi kondisi *sliding* adalah :

$$X_{prop} = \hat{X}_{prop} - K_1 \operatorname{sgn}(S) \quad (4.105)$$

maka dari persamaan (4.104) dan (4.105) diperoleh :

$$X_{prop} = - \left(\frac{aa_1 u + bb_1 v + cc_1 w + dd_1 p + ee_1 q + gg_1 r}{AA_1} \right) - \dots$$

$$\left(\frac{BB_1 \delta_{r_1} + CC_1 \delta_{s_1} + DD_1 K_{prop} + EE_1 \delta_{s_2} + GG_1 \delta_{r_2}}{AA_1} \right) - K_1 \operatorname{sgn}(S) \quad (4.106)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (4.106) ke (4.102), diperoleh :

$$\dot{S}(u, t) = aa_1 u + bb_1 v + cc_1 w + dd_1 p + ee_1 q + gg_1 r + \dots$$

$$AA_1 \left(- \left(\frac{aa_1 u + bb_1 v + cc_1 w + dd_1 p + ee_1 q + gg_1 r + BB_1 \delta_{r_1} + CC_1 \delta_{s_1} + DD_1 K_{prop} + EE_1 \delta_{s_2} + GG_1 \delta_{r_2}}{AA_1} \right) \right.$$

$$\left. - K_1 \operatorname{sgn}(S) \right) + BB_1 \delta_{r_1} + CC_1 \delta_{s_1} + DD_1 K_{prop} + EE_1 \delta_{s_2} + GG_1 \delta_{r_2}$$

$$\dot{S}(u, t) = -AA_1 K_1 \operatorname{sgn}(S) \quad (4.107)$$

Kemudian akan dirancang nilai K_1 dengan cara mensubstitusikan persamaan (4.107) ke dalam persamaan (4.108) agar memenuhi kondisi *sliding* yaitu :

$$S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (4.108)$$

$$-SAA_1 K_1 \operatorname{sgn}(S) \leq -\eta|S|$$

$$-AA_1 K_1 \operatorname{sgn}(S) \leq -\frac{\eta|S|}{S}$$

$$K_1 \geq \frac{\eta}{AA_1 \operatorname{sgn}(S)} \quad (4.109)$$

Dari persamaan (4.109) diperoleh bahwa nilai K_1 adalah :

$$K_1 = \left| \max \frac{\eta}{AA_1} \right| \quad (4.110)$$

kemudian digunakan suatu *boundary layer* untuk meminimalkan *chattering* dengan mengubah fungsi *signum* (sgn) menjadi fungsi *saturasi* (sat) sebagai berikut:

$$X_{prop} = \hat{X}_{prop} - K_1 \operatorname{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right) \quad (4.111)$$

Dengan demikian rancangan pengendali SMC untuk surge yang diperoleh dari mensubstitusikan persamaan (4.104) dan (4.110) ke persamaan (4.111) adalah sebagai berikut :

$$X_{prop} =$$

$$- \left(\frac{aa_1 u + bb_1 v + cc_1 w + dd_1 p + ee_1 q + gg_1 r + BB_1 \delta_{r_1} + CC_1 \delta_{s_1} + DD_1 K_{prop} + EE_1 \delta_{s_2} + GG_1 \delta_{r_2}}{AA_1} \right) - \left| \max \frac{\eta}{AA_1} \right| \operatorname{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right) \quad (4.112)$$

b. Sistem Kendali Sway dengan SMC

Dari persamaan (4.99) didapatkan *state* dari sway yang dapat dituliskan

$$\dot{v} = aa_2 u + bb_2 v + cc_2 w + dd_2 p + ee_2 q + gg_2 r + AA_2 X_{prop}$$

$$+BB_2 \delta_{r_1} + CC_2 \delta_{s_1} + DD_2 K_{prop} + EE_2 \delta_{s_2} + GG_2 \delta_{r_2} \quad (4.113)$$

Untuk mencari kontrol dari sway terlebih dahulu ditentukan tracking error dari sway sebagai berikut :

$$\tilde{v} = v - v_d \quad u_d = \text{konstan}$$

karena sistem berorde 1 maka dibentuk fungsi *switching* sebagai berikut :

$$S(v, t) = \left(\frac{d}{dt}\right)^{n-1} \tilde{v} \quad \text{dengan } n=1$$

$$S(v, t) = \left(\frac{d}{dt}\right)^{1-1} \tilde{v}$$

$$S(v, t) = \tilde{v} = v - v_d$$

sedangkan turunan dari S adalah :

$$\dot{S}(v, t) = \dot{v} - \dot{v}_d \quad (4.114)$$

karena $v_d = \text{konstan}$ maka $\dot{v}_d = 0$

Dengan mensubstitusikan persamaan (4.113) ke (4.114), menjadi :

$$\begin{aligned} \dot{S}(v, t) &= aa_2 u + bb_2 v + cc_2 w + dd_2 p + ee_2 q + gg_2 r + \dots \\ AA_2 X_{prop} + BB_2 \delta_{r_1} + CC_2 \delta_{s_1} + DD_2 K_{prop} + EE_2 \delta_{s_2} + GG_2 \delta_{r_2} \end{aligned} \quad (4.115)$$

selanjutnya ditentukan nilai δ_{r_1} dari persamaan (4.115) dengan nilai $\dot{S} = 0$

$$\begin{aligned} aa_2 u + bb_2 v + cc_2 w + dd_2 p + ee_2 q + gg_2 r + \dots \\ AA_2 X_{prop} + BB_2 \delta_{r_1} + CC_2 \delta_{s_1} + DD_2 K_{prop} + EE_2 \delta_{s_2} + GG_2 \delta_{r_2} = 0 \end{aligned} \quad (4.116)$$

Sehingga didapat $\hat{\delta}_{r_1}$ adalah

$$\begin{aligned} \hat{\delta}_{r_1} &= - \left(\frac{aa_2 u + bb_2 v + cc_2 w + dd_2 p + ee_2 q + gg_2 r}{BB_2} \right) - \dots \\ &\quad \left(\frac{AA_2 X_{prop} + CC_2 \delta_{s_1} + DD_2 K_{prop} + EE_2 \delta_{s_2} + GG_2 \delta_{r_2}}{BB_2} \right) \end{aligned} \quad (4.117)$$

Berdasarkan *control law* yang memenuhi kondisi *sliding* adalah :

$$\delta_{r_1} = \hat{\delta}_{r_1} - K_2 \text{sgn}(S) \quad (4.118)$$

maka dari persamaan (4.117) dan (4.118) diperoleh :

$$\begin{aligned} \hat{\delta}_{r_1} &= - \left(\frac{aa_2 u + bb_2 v + cc_2 w + dd_2 p + ee_2 q + gg_2 r}{BB_2} \right) - \dots \\ &\quad \left(\frac{AA_2 X_{prop} + CC_2 \delta_{s_1} + DD_2 K_{prop} + EE_2 \delta_{s_2} + GG_2 \delta_{r_2}}{BB_2} \right) - K_2 \text{sgn}(S) \end{aligned} \quad (4.119)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (4.119) ke (4.115), diperoleh:

$$\begin{aligned} \dot{S}(v, t) &= aa_2 u + bb_2 v + cc_2 w + dd_2 p + ee_2 q + gg_2 r + AA_2 X_{prop} + \dots \\ &\quad BB_2 \left(- \left(\frac{aa_2 u + bb_2 v + cc_2 w + dd_2 p + ee_2 q + gg_2 r}{BB_2} \right) - \left(\frac{AA_2 X_{prop} + CC_2 \delta_{s_1} + DD_2 K_{prop} + EE_2 \delta_{s_2} + GG_2 \delta_{r_2}}{BB_2} \right) - \right. \\ &\quad \left. K_2 \text{sgn}(S) \right) + CC_2 \delta_{s_1} + DD_2 K_{prop} + EE_2 \delta_{s_2} + GG_2 \delta_{r_2} \end{aligned}$$

$$\dot{S}(v, t) = -BB_2 K_2 \operatorname{sgn}(S) \quad (4.120)$$

kemudian akan dirancang nilai K_2 dengan cara mensubstitusikan persamaan (4.120) ke dalam persamaan (4.121) agar memenuhi kondisi *sliding* yaitu :

$$S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (4.121)$$

$$-SBB_2 K_2 \operatorname{sgn}(S) \leq -\eta|S|$$

$$-BB_2 K_2 \operatorname{sgn}(S) \leq -\frac{\eta|S|}{S}$$

$$K_2 \geq \frac{\eta}{BB_2 \operatorname{sgn}(S)} \quad (4.122)$$

Dari persamaan (4.122) diperoleh bahwa nilai K_2 adalah :

$$K_2 = \left| \max_{BB_2} \frac{\eta}{S} \right| \quad (4.123)$$

Kemudian digunakan suatu *boundary layer* untuk meminimalkan *chattering* dengan mengubah fungsi *signum* (sgn) menjadi fungsi *saturasi* (sat) sebagai berikut:

$$\delta_{r_1} = \hat{\delta}_{r_1} - K_2 \operatorname{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right) \quad (4.124)$$

Dengan demikian rancangan pengendali SMC untuk sway yang diperoleh dari mensubstitusikan persamaan (4.117) dan (4.123) ke persamaan (4.124) adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{r_1} = & - \left(\frac{aa_2 u + bb_2 v + cc_2 w + dd_2 p + ee_2 q + gg_2 r}{BB_2} \right) - \dots \\ & \left(\frac{AA_2 X_{prop} + CC_2 \delta_{s_1} + DD_2 K_{prop} + EE_2 \delta_{s_2} + GG_2 \delta_{r_2}}{BB_2} \right) - \left| \max_{BB_2} \frac{\eta}{S} \right| \operatorname{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right) \end{aligned} \quad (4.125)$$

c. Sistem Kendali Heave dengan SMC

Dari persamaan (4.99) didapatkan *state* dari heave yang dapat dituliskan

$$\begin{aligned} \dot{w} = & aa_3 u + bb_3 v + cc_3 w + dd_3 p + ee_3 q + gg_3 r + AA_3 X_{prop} + \dots \\ & BB_3 \delta_{r_1} + CC_3 \delta_{s_1} + DD_3 K_{prop} + EE_3 \delta_{s_2} + GG_3 \delta_{r_2} \end{aligned} \quad (4.126)$$

Untuk mencari kontrol dari heave terlebih dahulu ditentukan tracking error dari heave sebagai berikut

$$\tilde{w} = w - w_d \quad u_d = \text{konstan}$$

Karena sistem berorde 1 maka dibentuk fungsi *switching* sebagai berikut :

$$S(w, t) = \left(\frac{d}{dt} \right)^{n-1} \tilde{w} \quad \text{dengan } n=1$$

$$S(w, t) = \left(\frac{d}{dt} \right)^{1-1} \tilde{w}$$

$$S(w, t) = \tilde{w} = w - w_d$$

Sedangkan turunan dari S adalah :

$$\dot{S}(w, t) = \dot{w} - \dot{w}_d \quad (4.127)$$

Karena $w_d = \text{konstan}$ maka $\dot{w}_d = 0$

Dengan mensubstitusikan persamaan (4.126) ke (4.127), menjadi :

$$\begin{aligned} \dot{S}(w, t) = & aa_3 u + bb_3 v + cc_3 w + dd_3 p + ee_3 q + gg_3 r + \dots \\ & AA_3 X_{prop} + BB_3 \delta_{r_1} + CC_3 \delta_{s_1} + DD_3 K_{prop} + EE_3 \delta_{s_2} + GG_3 \delta_{r_2} \end{aligned} \quad (4.128)$$

Selanjutnya ditentukan nilai δ_{r_1} dari persamaan (4.128) dengan nilai $\dot{S} = 0$

$$\begin{aligned} & aa_3 u + bb_3 v + cc_3 w + dd_3 p + ee_3 q + gg_3 r + \dots \\ & AA_3 X_{prop} + BB_3 \delta_{r_1} + CC_3 \delta_{s_1} + DD_3 K_{prop} + EE_3 \delta_{s_2} + GG_3 \delta_{r_2} = 0 \end{aligned} \quad (4.129)$$

Sehingga didapat $\hat{\delta}_{s_1}$ adalah

$$\begin{aligned} \hat{\delta}_{s_1} = & - \left(\frac{aa_3 u + bb_3 v + cc_3 w + dd_3 p + ee_3 q + gg_3 r}{CC_3} \right) - \dots \\ & \left(\frac{AA_3 X_{prop} + BB_3 \delta_{r_1} + DD_3 K_{prop} + EE_3 \delta_{s_2} + GG_3 \delta_{r_2}}{CC_3} \right) \end{aligned} \quad (4.130)$$

Berdasarkan *control law* yang memenuhi kondisi *sliding* adalah :

$$\delta_{s_1} = \hat{\delta}_{s_1} - K_3 \operatorname{sgn}(S) \quad (4.131)$$

Maka dari persamaan (4.130) dan (4.131) diperoleh :

$$\begin{aligned} \delta_{s_1} = & - \left(\frac{aa_3 u + bb_3 v + cc_3 w + dd_3 p + ee_3 q + gg_3 r}{CC_3} \right) - \dots \\ & \left(\frac{AA_3 X_{prop} + BB_3 \delta_{r_1} + DD_3 K_{prop} + EE_3 \delta_{s_2} + GG_3 \delta_{r_2}}{CC_3} \right) - K_3 \operatorname{sgn}(S) \end{aligned} \quad (4.132)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (4.132) ke (4.128), diperoleh :

$$\begin{aligned} \dot{S}(u, t) = & aa_3 u + bb_3 v + cc_3 w + dd_3 p + ee_3 q + gg_3 r + AA_3 X_{prop} + BB_3 \delta_{r_1} + \\ & CC_3 \left(- \left(\frac{aa_3 u + bb_3 v + cc_3 w + dd_3 p + ee_3 q + gg_3 r}{CC_3} \right) - \left(\frac{AA_3 X_{prop} + BB_3 \delta_{r_1} + DD_3 K_{prop} + EE_3 \delta_{s_2} + GG_3 \delta_{r_2}}{CC_3} \right) - \right. \\ & \left. K_3 \operatorname{sgn}(S) \right) + DD_3 K_{prop} + EE_3 \delta_{s_2} + GG_3 \delta_{r_2} \\ \dot{S}(w, t) = & -CC_3 K_3 \operatorname{sgn}(S) \end{aligned} \quad (4.133)$$

Kemudian akan dirancang nilai K_3 dengan cara mensubstitusikan persamaan (4.133) ke dalam persamaan (4.134) agar memenuhi kondisi *sliding* yaitu :

$$S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (4.134)$$

$$-SCC_3 K_3 \operatorname{sgn}(S) \leq -\eta|S|$$

$$-CC_3 K_3 \operatorname{sgn}(S) \leq -\frac{\eta|S|}{S}$$

$$K_3 \geq \frac{\eta}{CC_3 \operatorname{sgn}(S)} \quad (4.135)$$

Dari persamaan (4.135) diperoleh bahwa nilai K_3 adalah :

$$K_3 = \left| \max \frac{\eta}{CC_3} \right| \quad (4.136)$$

Kemudian digunakan suatu *boundary layer* untuk meminimalkan *chattering* dengan mengubah fungsi *signum* (sgn) menjadi fungsi *saturasi* (sat) sebagai berikut:

$$\delta_{s_1} = \hat{\delta}_{s_1} - K_3 \text{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right) \quad (4.137)$$

Dengan demikian rancangan pengendali SMC untuk heave yang diperoleh dari mensubstitusikan persamaan (4.130) dan (4.136) ke persamaan (4.137) adalah sebagai berikut :

$$\delta_{s_1} = - \left(\frac{aa_3 u + bb_3 v + cc_3 w + dd_3 p + ee_3 q + gg_3 r}{CC_3} \right) - \dots$$

$$\left(\frac{AA_3 X_{prop} + BB_3 \delta_{r_1} + DD_3 K_{prop} + EE_3 \delta_{s_2} + GG_3 \delta_{r_2}}{CC_3} \right) - \left| \max \frac{\eta}{CC_3} \right| \text{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right) \quad (4.138)$$

d. Sistem Kendali Roll dengan SMC

Dari persamaan (4.99) didapatkan *state* dari roll yang dapat dituliskan

$$\dot{p} = aa_4 u + bb_4 v + cc_4 w + dd_4 p + ee_4 q + gg_4 r + AA_4 X_{prop} + \dots$$

$$BB_4 \delta_{r_1} + CC_4 \delta_{s_1} + DD_4 K_{prop} + EE_4 \delta_{s_2} + GG_4 \delta_{r_2} \quad (4.139)$$

Untuk mencari kontrol dari roll terlebih dahulu ditentukan tracking error dari roll sebagai berikut:

$$\tilde{p} = p - p_d \quad u_d = \text{konstan}$$

karena sistem berorde 1 maka dibentuk fungsi *switching* sebagai berikut :

$$S(p, t) = \left(\frac{d}{dt} \right)^{n-1} \tilde{p} \quad \text{dengan } n=1$$

$$S(p, t) = \left(\frac{d}{dt} \right)^{1-1} \tilde{p}$$

$$S(p, t) = \tilde{p} = p - p_d$$

sedangkan turunan dari S adalah :

$$\dot{S}(p, t) = \dot{p} - \dot{p}_d \quad (4.140)$$

karena $p_d = \text{konstan}$ maka $\dot{p}_d = 0$

dengan mensubstitusikan persamaan (4.139) ke (4.140), menjadi :

$$\dot{S}(p, t) = aa_4 u + bb_4 v + cc_4 w + dd_4 p + ee_4 q + gg_4 r + \dots$$

$$AA_4 X_{prop} + BB_4 \delta_{r_1} + CC_4 \delta_{s_1} + DD_4 K_{prop} + EE_4 \delta_{s_2} + GG_4 \delta_{r_2} \quad (4.141)$$

Selanjutnya ditentukan nilai \hat{K}_{prop} dari persamaan (4.141) dengan nilai $\dot{S} = 0$

$$aa_4 u + bb_4 v + cc_4 w + dd_4 p + ee_4 q + gg_4 r + \dots$$

$$AA_4 X_{prop} + BB_4 \delta_{r_1} + CC_4 \delta_{s_1} + DD_4 K_{prop} + EE_4 \delta_{s_2} + GG_4 \delta_{r_2} = 0 \quad (4.142)$$

Sehingga didapat \hat{K}_{prop} adalah

$$\hat{K}_{prop} = - \left(\frac{aa_4 u + bb_4 v + cc_4 w + dd_4 p + ee_4 q + gg_4 r}{DD_4} \right) - \dots$$

$$\left(\frac{AA_4 X_{prop} + BB_4 \delta_{r1} + CC_4 \delta_{s1} + EE_4 \delta_{s2} + GG_4 \delta_{r2}}{DD_4} \right) \quad (4.143)$$

Berdasarkan *control law* yang memenuhi kondisi *sliding* adalah :

$$K_{prop} = \hat{K}_{prop} - K_4 \operatorname{sgn}(S) \quad (4.144)$$

Maka dari persamaan (4.143) dan (4.144) diperoleh :

$$K_{prop} = - \left(\frac{aa_4 u + bb_4 v + cc_4 w + dd_4 p + ee_4 q + gg_4 r}{DD_4} \right) - \dots$$

$$\left(\frac{AA_4 X_{prop} + BB_4 \delta_{r1} + CC_4 \delta_{s1} + EE_4 \delta_{s2} + GG_4 \delta_{r2}}{DD_4} \right) - K_4 \operatorname{sgn}(S) \quad (4.145)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (4.145) ke (4.141), diperoleh :

$$\dot{S}(p, t) = aa_4 u + bb_4 v + cc_4 w + dd_4 p + ee_4 q + gg_4 r + \dots$$

$$+ AA_4 X_{prop} + BB_4 \delta_{r1} + CC_4 \delta_{s1} + \dots$$

$$DD_4 \left(- \left(\frac{aa_4 u + bb_4 v + cc_4 w + dd_4 p + ee_4 q + gg_4 r}{DD_4} \right) \right.$$

$$\left. - \left(\frac{AA_4 X_{prop} + BB_4 \delta_{r1} + CC_4 \delta_{s1} + EE_4 \delta_{s2} + GG_4 \delta_{r2}}{DD_4} \right) - K_4 \operatorname{sgn}(S) \right)$$

$$+ EE_4 \delta_{s2} + GG_4 \delta_{r2}$$

$$\dot{S}(p, t) = -DD_4 K_4 \operatorname{sgn}(S) \quad (4.146)$$

Kemudian akan dirancang nilai K_4 dengan cara mensubstitusikan persamaan (4.146) ke dalam persamaan (4.163) agar memenuhi kondisi *sliding* yaitu :

$$S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (4.147)$$

$$-SDD_4 K_4 \operatorname{sgn}(S) \leq -\eta|S|$$

$$-DD_4 K_4 \operatorname{sgn}(S) \leq -\frac{\eta|S|}{S}$$

$$K_4 \geq \frac{\eta}{DD_4 \operatorname{sgn}(S)} \quad (4.148)$$

Dari persamaan (4.148) diperoleh bahwa nilai K_4 adalah :

$$K_4 = \left| \max \frac{\eta}{DD_4} \right| \quad (4.149)$$

Kemudian digunakan suatu *boundary layer* untuk meminimalkan *chattering* dengan mengubah fungsi *signum* (sgn) menjadi fungsi *saturasi* (sat) sebagai berikut:

$$K_{prop} = \hat{K}_{prop} - K_4 \operatorname{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right) \quad (4.150)$$

Dengan demikian rancangan pengendali SMC untuk roll yang diperoleh dari mensubstitusikan persamaan (4.143) dan (4.149) ke persamaan (4.150) adalah sebagai berikut :

$$K_{prop} = - \left(\frac{aa_4 u + bb_4 v + cc_4 w + dd_4 p + ee_4 q + gg_4 r}{DD_4} \right) - \dots$$

$$\left(\frac{AA_4 X_{prop} + BB_4 \delta_{r1} + CC_4 \delta_{s1} + EE_4 \delta_{s2} + GG_4 \delta_{r2}}{DD_4} \right) - \left| \max \frac{\eta}{AA_1} \right| \text{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right) \quad (4.151)$$

e. Sistem Kendali Pitch dengan SMC

Dari persamaan (4.99) didapatkan *state* dari pitch yang dapat dituliskan

$$\dot{q} = aa_5 u + bb_5 v + cc_5 w + dd_5 p + ee_5 q + gg_5 r + \dots$$

$$AA_3 X_{prop} + BB_5 \delta_{r1} + CC_5 \delta_{s1} + DD_5 K_{prop} + EE_5 \delta_{s2} + GG_5 \delta_{r2} \quad (4.152)$$

Untuk mencari kontrol dari pitch terlebih dahulu ditentukan tracking error dari pitch sebagai berikut :

$$\tilde{q} = q - q_d \quad u_d = \text{konstan}$$

karena sistem berorde 1 maka dibentuk fungsi *switching* sebagai berikut :

$$S(q, t) = \left(\frac{d}{dt} \right)^{n-1} \tilde{q} \quad \text{dengan } n=1$$

$$S(q, t) = \left(\frac{d}{dt} \right)^{1-1} \tilde{q}$$

$$S(q, t) = \tilde{q} = q - q_d$$

sedangkan turunan dari S adalah :

$$\dot{S}(q, t) = \dot{q} - \dot{q}_d \quad (4.153)$$

karena $q_d = \text{konstan}$ maka $\dot{q}_d = 0$

dengan mensubstitusikan persamaan (4.152) ke (4.153), menjadi :

$$\dot{S}(q, t) = aa_5 u + bb_5 v + cc_5 w + dd_5 p + ee_5 q + gg_5 r + AA_3 X_{prop} + BB_5 \delta_{r1} + CC_5 \delta_{s1} +$$

$$DD_5 K_{prop} + EE_5 \delta_{s2} + GG_5 \delta_{r2} \quad (4.154)$$

selanjutnya ditentukan nilai δ_{r1} dari persamaan (4.154) dengan nilai $\dot{S} = 0$

$$aa_5 u + bb_5 v + cc_5 w + dd_5 p + ee_5 q + gg_5 r + \dots$$

$$AA_3 X_{prop} + BB_5 \delta_{r1} + CC_5 \delta_{s1} + DD_5 K_{prop} + EE_5 \delta_{s2} + GG_5 \delta_{r2} = 0 \quad (4.155)$$

sehingga didapat $\hat{\delta}_{s1}$ adalah

$$\hat{\delta}_{s2} = - \left(\frac{aa_5 u + bb_5 v + cc_5 w + dd_5 p + ee_5 q + gg_5 r}{EE_5} \right) - \dots$$

$$\left(\frac{AA_3 X_{prop} + BB_5 \delta_{r1} + CC_5 \delta_{s1} + DD_5 K_{prop} + GG_5 \delta_{r2}}{EE_5} \right) \quad (4.156)$$

Berdasarkan *control law* yang memenuhi kondisi *sliding* adalah :

$$\delta_{s2} = \hat{\delta}_{s2} - K_5 \text{sgn}(S) \quad (4.157)$$

maka dari persamaan (4.156) dan (4.157) diperoleh :

$$\delta_{s_2} = - \left(\frac{aa_5 u + bb_5 v + cc_5 w + dd_5 p + ee_5 q + gg_5 r}{EE_5} \right) - \dots$$

$$\left(\frac{AA_3 X_{prop} + BB_5 \delta_{r_1} + CC_5 \delta_{s_1} + DD_5 K_{prop} + GG_5 \delta_{r_2}}{EE_5} \right) - K_5 \operatorname{sgn}(S) \quad (4.158)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (4.158) ke (4.154), diperoleh :

$$\dot{S}(q, t) = aa_5 u + bb_5 v + cc_5 w + dd_5 p + ee_5 q + gg_5 r + \dots$$

$$AA_3 X_{prop} + BB_5 \delta_{r_1} + CC_5 \delta_{s_1} + DD_5 K_{prop} + \dots$$

$$EE_5 \left(- \left(\frac{aa_5 u + bb_5 v + cc_5 w + dd_5 p + ee_5 q + gg_5 r}{EE_5} \right) - \left(\frac{AA_3 X_{prop} + BB_5 \delta_{r_1} + CC_5 \delta_{s_1} + DD_5 K_{prop} + GG_5 \delta_{r_2}}{EE_5} \right) - \right.$$

$$\left. K_5 \operatorname{sgn}(S) \right) + GG_5 \delta_{r_2}$$

$$\dot{S}(w, t) = -EE_5 K_5 \operatorname{sgn}(S) \quad (4.159)$$

Kemudian akan dirancang nilai K_5 dengan cara mensubstitusikan persamaan (4.159) ke dalam persamaan (4.160) agar memenuhi kondisi *sliding* yaitu :

$$S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (4.160)$$

$$-S EE_5 K_5 \operatorname{sgn}(S) \leq -\eta|S|$$

$$-EE_5 K_5 \operatorname{sgn}(S) \leq -\frac{\eta|S|}{S}$$

$$K_5 \geq \frac{\eta}{EE_5 \operatorname{sgn}(S)} \quad (4.161)$$

dari persamaan (4.161) diperoleh bahwa nilai K_5 adalah :

$$K_5 = \left| \max \frac{\eta}{EE_5} \right| \quad (4.162)$$

kemudian digunakan suatu *boundary layer* untuk meminimalkan *chattering* dengan mengubah fungsi *signum* (sgn) menjadi fungsi *saturasi* (sat) sebagai berikut:

$$\delta_{s_2} = \hat{\delta}_{s_2} - K_5 \operatorname{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right) \quad (4.163)$$

Dengan demikian rancangan pengendali SMC untuk pitch yang diperoleh dari mensubstitusikan persamaan (4.156) dan (4.162) ke persamaan (4.163) adalah sebagai berikut :

$$\delta_{s_2} = - \left(\frac{aa_5 u + bb_5 v + cc_5 w + dd_5 p + ee_5 q + gg_5 r}{EE_5} \right) - \dots$$

$$\left(\frac{AA_3 X_{prop} + BB_5 \delta_{r_1} + CC_5 \delta_{s_1} + DD_5 K_{prop} + GG_5 \delta_{r_2}}{EE_5} \right) - \left| \max \frac{\eta}{EE_5} \right| \operatorname{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right) \quad (4.164)$$

f. Sistem Kendali Yaw dengan SMC

Dari persamaan (4.99) didapatkan *state* dari yaw yang dapat dituliskan

$$\dot{r} = aa_6 u + bb_6 v + cc_6 w + dd_6 p + ee_6 q + gg_6 r + \dots$$

$$AA_6 X_{prop} + BB_6 \delta_{r_1} + CC_6 \delta_{s_1} + DD_6 K_{prop} + EE_6 \delta_{s_2} + GG_6 \delta_{r_2} \quad (4.165)$$

untuk mencari kontrol dari yaw terlebih dahulu ditentukan tracking error dari yaw sebagai berikut :

$$\tilde{r} = r - r_d \quad u_d = \text{konstan}$$

karena sistem berorde 1 maka dibentuk fungsi *switching* sebagai berikut :

$$S(r, t) = \left(\frac{d}{dt} \right)^{n-1} \tilde{r} \quad \text{dengan } n=1$$

$$S(r, t) = \left(\frac{d}{dt} \right)^{1-1} \tilde{r}$$

$$S(r, t) = \tilde{r} = r - r_d$$

sedangkan turunan dari S adalah :

$$\dot{S}(r, t) = \dot{r} - \dot{r}_d \quad (4.166)$$

karena $r_d = \text{konstan}$ maka $\dot{r}_d = 0$

dengan mensubstitusikan persamaan (4.165) ke (4.166), didapatkan bentuk:

$$\begin{aligned} \dot{S}(v, t) = & aa_6 u + bb_6 v + cc_6 w + dd_6 p + ee_6 q + gg_6 r + \dots \\ & AA_6 X_{prop} + BB_6 \delta_{r_1} + CC_6 \delta_{s_1} + DD_6 K_{prop} + EE_6 \delta_{s_2} + GG_6 \delta_{r_2} \end{aligned} \quad (4.167)$$

berikutnya ditentukan nilai δ_{r_2} dari persamaan (4.167) dengan nilai $\dot{S} = 0$

$$\begin{aligned} & aa_6 u + bb_6 v + cc_6 w + dd_6 p + ee_6 q + gg_6 r + \dots \\ & AA_6 X_{prop} + BB_6 \delta_{r_1} + CC_6 \delta_{s_1} + DD_6 K_{prop} + EE_6 \delta_{s_2} + GG_6 \delta_{r_2} = 0 \end{aligned} \quad (4.168)$$

sehingga didapat $\hat{\delta}_{r_2}$ adalah

$$\begin{aligned} \hat{\delta}_{r_2} = & - \left(\frac{aa_6 u + bb_6 v + cc_6 w + dd_6 p + ee_6 q + gg_6 r}{GG_6} \right) - \dots \\ & \left(\frac{AA_6 X_{prop} + BB_6 \delta_{r_1} + CC_6 \delta_{s_1} + DD_6 K_{prop} + EE_6 \delta_{s_2}}{GG_6} \right) \end{aligned} \quad (4.169)$$

Berdasarkan *control law* yang memenuhi kondisi *sliding*, yaitu:

$$\delta_{r_2} = \hat{\delta}_{r_2} - K_6 \text{sgn}(S) \quad (4.170)$$

maka dari persamaan (4.170) dan (4.169) diperoleh:

$$\begin{aligned} \delta_{r_2} = & - \left(\frac{aa_6 u + bb_6 v + cc_6 w + dd_6 p + ee_6 q + gg_6 r}{GG_6} \right) - \dots \\ & \left(\frac{AA_6 X_{prop} + BB_6 \delta_{r_1} + CC_6 \delta_{s_1} + DD_6 K_{prop} + EE_6 \delta_{s_2}}{GG_6} \right) - K_6 \text{sgn}(S) \end{aligned} \quad (4.171)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (4.171) ke (4.167), diperoleh:

$$\begin{aligned} \dot{S}(r, t) = & aa_6 u + bb_6 v + cc_6 w + dd_6 p + ee_6 q + gg_6 r + \dots \\ & AA_6 X_{prop} + BB_6 \delta_{r_1} + CC_6 \delta_{s_1} + DD_6 K_{prop} + EE_6 \delta_{s_2} + \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& GG_6 \left(- \left(\frac{aa_6 u + bb_6 v + cc_6 w + dd_6 p + ee_6 q + gg_6 r}{GG_6} \right) \right. \\
& \quad \left. - \left(\frac{AA_6 X_{prop} + BB_6 \delta_{r1} + CC_6 \delta_{s1} + DD_6 K_{prop} + EE_6 \delta_{s2}}{GG_6} \right) - K_6 \operatorname{sgn}(S) \right) \\
\dot{S}(r, t) = & -GG_6 K_6 \operatorname{sgn}(S)
\end{aligned} \tag{4.172}$$

Selanjutnya akan dirancang nilai K_6 dengan cara mensubstitusikan persamaan (4.172) ke dalam persamaan (4.173) agar memenuhi kondisi *sliding* yaitu :

$$S\dot{S} \leq -\eta|S| \tag{4.173}$$

$$-S GG_6 K_6 \operatorname{sgn}(S) \leq -\eta|S|$$

$$-GG_6 K_6 \operatorname{sgn}(S) \leq -\frac{\eta|S|}{S}$$

$$K_6 \geq \frac{\eta}{GG_6 \operatorname{sgn}(S)} \tag{4.174}$$

dari persamaan (4.174) diperoleh bahwa nilai K_6 adalah :

$$K_6 = \left| \max \frac{\eta}{GG_6} \right| \tag{4.175}$$

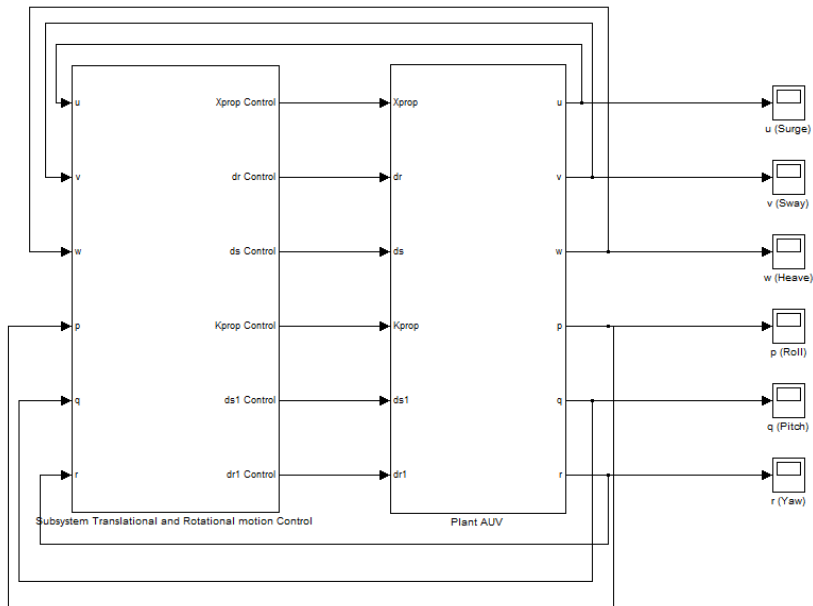
Berikutnya digunakan suatu *boundary layer* untuk meminimalkan *chattering* dengan mengubah fungsi *signum* (sgn) menjadi fungsi *Saturasi* (sat) sebagai berikut:

$$\delta_{r2} = \hat{\delta}_{r2} - K_6 \operatorname{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right) \tag{4.176}$$

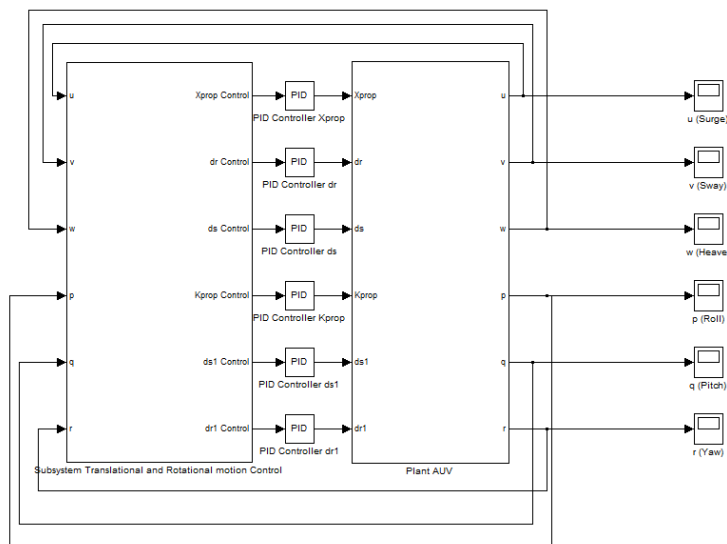
Dengan demikian rancangan pengendali SMC untuk yaw yang diperoleh dari mensubstitusikan persamaan (4.169) dan (4.175) ke persamaan (4.176) adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
\delta_{r2} = & - \left(\frac{aa_6 u + bb_6 v + cc_6 w + dd_6 p + ee_6 q + gg_6 r}{GG_6} \right) - \dots \\
& \left(\frac{AA_6 X_{prop} + BB_6 \delta_{r1} + CC_6 \delta_{s1} + DD_6 K_{prop} + EE_6 \delta_{s2}}{GG_6} \right) - \left| \max \frac{\eta}{BB_2} \right| \operatorname{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right)
\end{aligned} \tag{4.177}$$

Setelah rancangan sistem kendali SMC pada model linier 6-DOF diperoleh kemudian digabungkan dengan PID, selanjutnya disimulasikan pada simulink Matlab sehingga didapatkan respon dari SMC dan SPID. Sistem pengendali ini dirangkai pada blok diagram dengan AUV berupa lup tertutup yang tampak pada Gambar 4.39 dan 4.40.



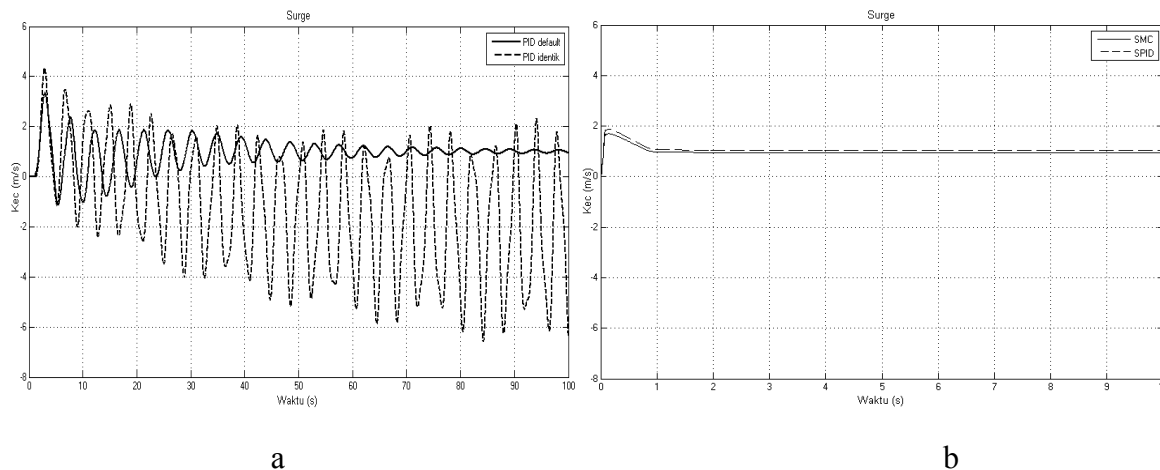
Gambar 4.39. Blok diagram AUV dengan sistem kendali SMC



Gambar 4.40. Blok diagram AUV dengan sistem kendali SPID

4.8.3 Hasil Simulasi Sistem Kendali PID, SMC dan SPID

Pada sub-bab ini dibahas perbandingan respon dari sistem kendali PID default, PID identik, SMC dan SPID yang telah dibuat blok diagramnya dan telah disimulasikan. Sehingga dihasilkan respon surge sway, heave, roll, pitch dan yaw yang tampak pada Gambar 4.41-4.46



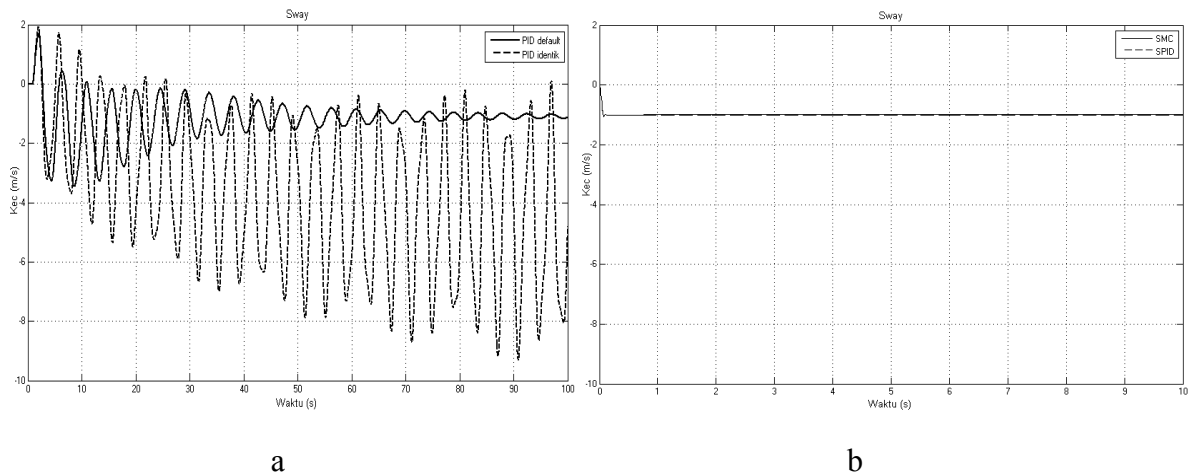
Gambar 4.41. Respon surge pada AUV dengan sistem kendali a) PID default dan identik
b) SMC dan SPID

Perbandingan respon surge pada Gambar 4.41a merupakan hasil simulasi AUV menggunakan metode PID default dengan nilai *proportional* = 10, *Integral* = 1.5 dan *Derivative* = 2 dan metode PID identik dengan nilai *proportional* = 2.1, *Integral* = 0 dan *Derivative* = 0. Respon yang dihasilkan oleh PID, untuk gerak surge lebih stabil dengan setpoint 1 m/s dan dapat mencapai *settling time* 80 detik dengan maksimum *overshoot* 3.4 m/s dan memiliki error 4.36%. Respon yang dihasilkan oleh PID identik, masih belum stabil dan tidak pernah mencapai *settling time* pada setpoint.

Perbandingan respon surge pada Gambar 4.41b merupakan hasil simulasi AUV dengan sistem kendali SMC dan SPID. Hasil kedua metode tersebut menunjukkan kesamaan untuk *delay time*, *rise time*, *peak time* dan *settling time* di mana *delay time* 0.03s, *rise time* 0.05s, *peak time* 0.08s dan *settling time* 1 s. SMC dan SPID stabil pada setpoint 1 m/s pada waktu 1 s . Jika dilihat dari error yang dihasilkan SPID adalah 3.4% sedangkan SMC 4.15% sehingga SPID lebih baik daripada SMC tetapi memiliki *overshoot* yang lebih tinggi. Dalam hal ini *overshoot* bukan setting prioritas utama untuk unjuk performance platform *autonomous*, yang diutamakan adalah *settling time* dan error yang dihasilkan.

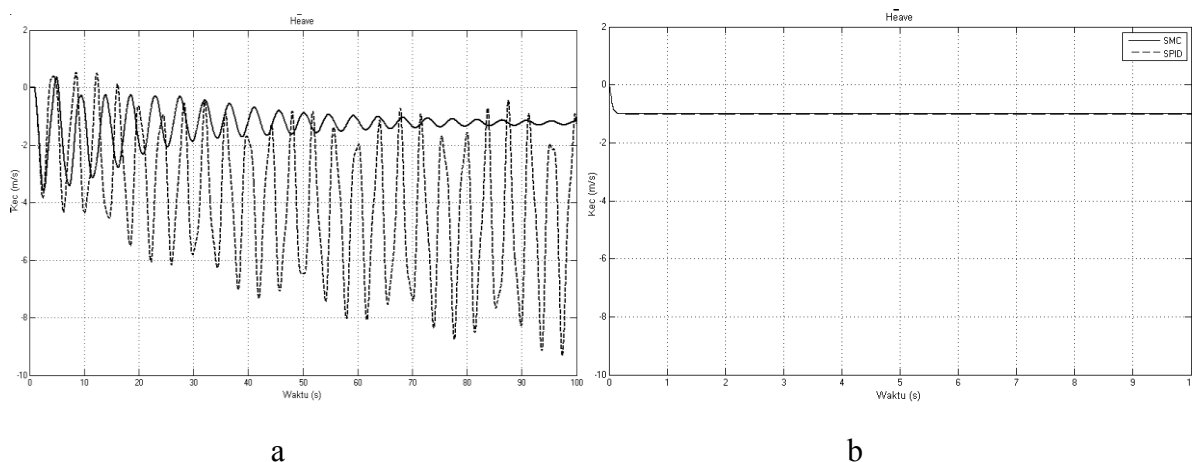
Perbandingan respon sway pada Gambar 4.42a merupakan hasil simulasi AUV menerapkan metode PID default dengan nilai *proportional* = 1, *Integral* = 10 dan *Derivative* = 1 dan metode PID identik dengan nilai *proportional* = 2.01, *Integral* = 0 dan *Derivative* = 0. Respon yang dihasilkan oleh PID untuk gerak sway lebih stabil dengan setpoint -1 m/s dan dapat mencapai *settling time* 76 detik dengan maksimum *overshoot* -3.4 m/s dan memiliki error 13.2%. Respon yang didapatkan dengan

simulasi PID identik masih belum stabil dan tidak pernah mencapai *settling time* pada setpoint.



Gambar 4.42. Respon sway pada AUV dengan sistem kendali a) PID default dan identik
b) SMC dan SPID

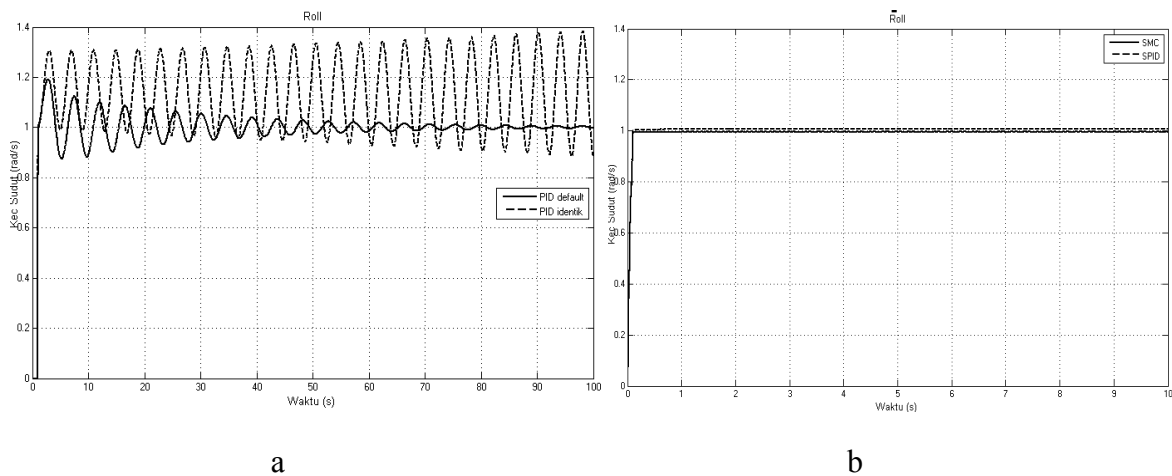
Perbandingan respon sway pada Gambar 4.42b merupakan hasil simulasi AUV dengan sistem kendali SMC dan SPID. Hasil kedua metode tersebut menunjukkan kesamaan untuk *delay time*, *rise time*, *peak time* dan *settling time* di mana *delay time* 0.037 s, *rise time* 0.065 s, *peak time* 0.07 s dan *settling time* 0.1 s. SMC dan SPID sudah stabil pada setpoint -1 m/s pada waktu 0.1 s. Jika dilihat dari error yang dihasilkan SPID adalah 0.9% sedangkan SMC 0.11% sehingga SPID lebih baik daripada SMC tetapi memiliki *overshoot* yang agak lebih tinggi. Dalam hal ini *overshoot* bukan setting prioritas utama untuk unjuk performance platform *autonomous*, yang diutamakan adalah *settling time* dan error yang dihasilkan.



Gambar 4.43. Respon heave pada AUV dengan sistem kendali a) PID default dan identik
b) SMC dan SPID

Perbandingan respon heave pada Gambar 4.43a merupakan hasil simulasi AUV menggunakan metode PID default dengan nilai *proportional* = 3, *Integral* = 1.5 dan *Derivative* = 2 dan PID identik dengan nilai *proportional* = 2.01, *Integral* = 0 dan *Derivative* = 0. Hasil respon PID default untuk gerak heave lebih stabil dengan setpoint -1 m/s dan dapat mencapai *settling time* 80 detik dengan maksimum *overshoot* -3.6 m/s dan memiliki error 17.3%. Respon dengan PID identik hasilnya masih belum stabil dan tidak pernah mencapai *settling time* pada setpoint.

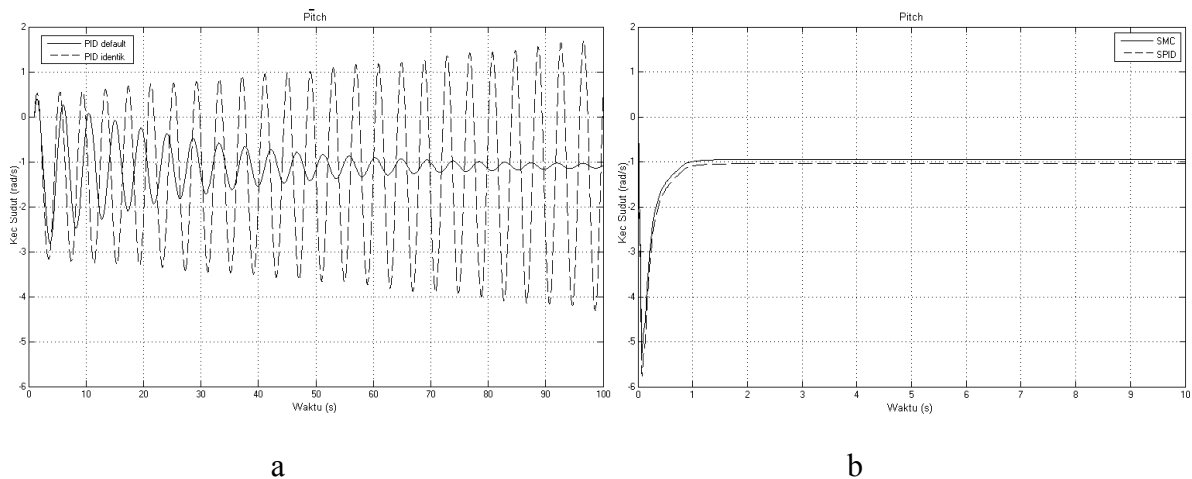
Perbandingan respon heave pada Gambar 4.43b merupakan hasil simulasi AUV dengan sistem kendali SMC dan SPID. Hasil kedua metode tersebut menunjukkan kesamaan untuk *delay time*, di mana *delay time* 0.037 s. SMC memiliki *rise time* 0.15 s dan *settling time* 0.2 s, sedangkan SPID memiliki *rise time* 0.25 s dan *settling time* 0.25 s. SMC dan SPID sudah stabil pada setpoint 1 m/s pada waktu 0.2 s. SMC dan SPID pada respon heave tidak memiliki *peak time* dan *maximum overshoot*. Jika dilihat dari error yang dihasilkan SMC adalah 0.19% sedangkan SPID 0.8% sehingga SMC lebih baik daripada SPID untuk respon heave.



Gambar 4.44. Respon roll pada AUV dengan sistem kendali a) PID default dan identik
b) SMC dan SPID

Perbandingan respon roll pada Gambar 4.44a merupakan hasil simulasi AUV dengan sistem kendali PID default dengan nilai *proportional* = 2, *Integral* = 1 dan *Derivative* = 0.01 dan PID identik dengan nilai *proportional* = 2.01, *Integral* = 0 dan *Derivative* = 0. Hasil respon PID default untuk gerak roll lebih stabil dengan setpoint 1 rad/s dan dapat mencapai *settling time* 40 detik dengan maksimum *overshoot* 1.2 rad/s dan memiliki error 0.4%. Respon dengan PID identik hasilnya masih belum stabil dan tidak pernah mencapai *settling time* pada setpoint.

Perbandingan respon roll pada Gambar 4.44b merupakan hasil simulasi AUV dengan sistem kendali SMC dan SPID. Hasil kedua metode tersebut menunjukkan kesamaan untuk *delay time*, *rise time*, *peak time* dan *settling time* di mana *delay time* 0.04 s, *rise time* 0.12 s, dan *settling time* 0.12 s. Respon yang dihasilkan oleh metode SMC dan SPID stabil pada setpoint 1 rad/s pada waktu 0.12 s. SMC dan SPID pada respon roll tidak memiliki *peak time* dan *maximum overshoot*. Jika dilihat dari error yang dihasilkan SMC adalah 0.42% sedangkan SPID 0.6% sehingga SMC lebih baik daripada SPID untuk respon roll.

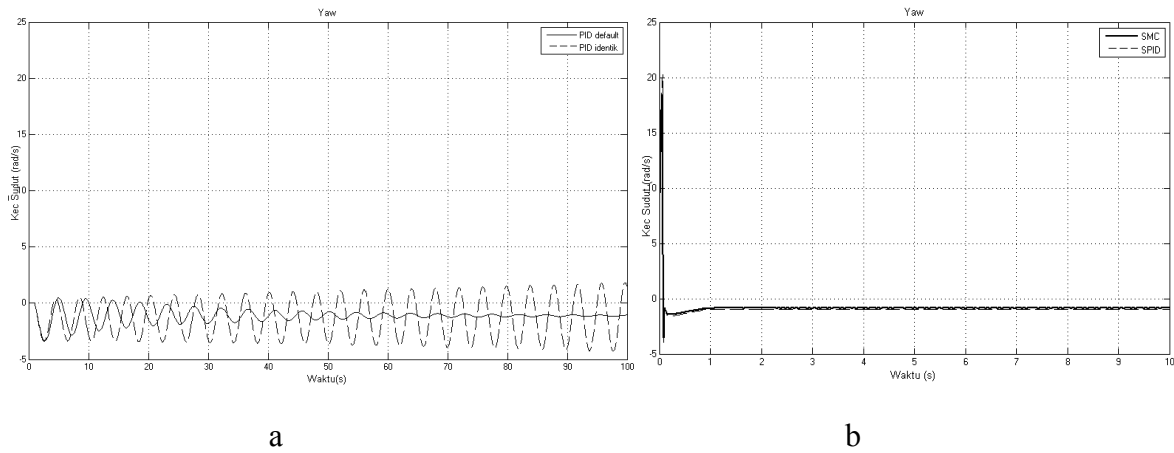


Gambar 4.45. Respon pitch pada AUV dengan sistem kendali a) PID default dan identik
b) SMC dan SPID

Perbandingan respon pada Gambar 4.45a merupakan hasil simulasi AUV dengan sistem kendali PID default dengan nilai *proportional* = 2, *Integral* = 1 dan *Derivative* = 0.01 dan PID identik dengan nilai *proportional* = 2.1, *Integral* = 0 dan *Derivative* = 0. Hasil respon PID default untuk gerak pitch lebih stabil dengan setpoint -1 rad/s dan dapat mencapai *settling time* 70 detik dengan maksimum *overshoot* -2.8 rad/s dan memiliki error 8.9%. Respon dengan PID identik masih belum stabil dan tidak pernah mencapai *settling time* pada setpoint.

Perbandingan respon pitch pada Gambar 4.45b merupakan hasil simulasi AUV dengan sistem kendali SMC dan SPID. Hasil kedua metode tersebut menunjukkan kesamaan untuk *delay time*, *rise time*, *peak time* di mana *delay time* 0.01 s, *rise time* 0.02 s, *peak time* 0.075s. Hasil respon dengan metode SMC dan SPID stabil pada setpoint -1 rad/s, *settling time* SMC pada waktu 1.5 s, sedangkan SPID pada waktu 1.25 s. Jika dilihat dari error yang dihasilkan SPID adalah 4.3% sedangkan SMC 4.58% sehingga SPID lebih baik daripada SMC tetapi memiliki overshoot yang lebih

tinggi. Dalam hal ini *overshoot* bukan setting prioritas utama untuk unjuk performance platform *autonomous*, yang diutamakan adalah *settling time* dan error yang dihasilkan.



Gambar 4.46. Respon yaw pada AUV dengan sistem kendali a) PID default dan identik b) SMC dan SPID

Perbandingan respon pada Gambar 4.46a merupakan hasil simulasi AUV dengan menerapkan metode PID default dengan nilai *proportional* = 2, *Integral* = 1 dan *Derivative* = 0.01 dan metode PID identik dengan nilai *proportional* = 2.1, *Integral* = 0 dan *Derivative* = 0. Hasil respon dengan PID default hasilnya untuk gerak yaw lebih stabil dengan setpoint -1 rad/s dan dapat mencapai *settling time* 60 detik dengan maksimum *overshoot* -3.4 rad/s dan memiliki error 5.8%. Respon dengan PID identik masih belum stabil dan tidak pernah mencapai *settling time* pada setpoint.

Perbandingan respon yaw pada Gambar 4.46b merupakan hasil simulasi AUV dengan sistem kendali SMC dan SPID. Hasil kedua metode tersebut menunjukkan kesamaan untuk *delay time*, *rise time*, *peak time* dan *settling time* di mana *delay time* 0.002 s, *rise time* 0.082 s, *peak time* 0.07 s dan *settling time* 0.2 s. Hasil metode SMC dan SPID stabil pada setpoint -1 rad/s pada waktu 0.2 s. Jika dilihat dari error yang dihasilkan SMC adalah 3.66% sedangkan SPID 4.77% sehingga metode SMC lebih baik daripada SPID. SMC memiliki *overshoot* yang lebih rendah dari SPID. Dalam hal ini *overshoot* bukan setting prioritas utama untuk unjuk performance platform *autonomous*, yang diutamakan adalah *settling time* dan error yang dihasilkan.

Perbandingan *delay time*, *rise time*, *peak time*, *maximum overshoot*, *settling time* dan error masing-masing respon dengan system kendali PID default, PID identik, SMC dan SPID tampak pada Tabel 4.36–4.41 untuk respon surge, sway, heave, roll, pitch

dan yaw. Dari perbandingan respon ini dapat disimpulkan sistem kendali yang terbaik untuk AUV dilihat dari error dan *settling time*.

Tabel 4.36. Spesifikasi respon *transient* pada gerak surge

		SMC	SPID	PID (Default)	PID (Identik)
Delay Time (t_d)	[sec]	0,03	0.029	1.6	1.8
Rise Time (t_r)	[sec]	0,05	0.046	1.8	2.2
Peak Time (t_p)	[sec]	0,08	0.08	3	3
Maximum Peak (M_p)	[m/s]	1.7	1.85	3.4	4.2
Settling Time (t_s)	[sec]	1	1	80	Inf
Error	[%]	4.15	3.4	4.36	Inf

Perbandingan spesifikasi respon *transient* pada gerak surge antara SMC, SPID, PID default dan PID identik pada Tabel 4.36 tampak bahwa error terkecil ketika menggunakan sistem kendali SPID. Terlihat bahwa *delay time*, *rise time*, *peak time* dan *settling time* antara SMC dan SPID hampir sama. Error yang terjadi pada SPID adalah 3.4% dan Error SMC 4.15%, namun untuk PID identik terdapat error *infinity* karena tidak dapat stabil. Untuk PID default mempunyai error 4.36% tetapi dengan *settling time* yang berbeda jauh dengan SMC dan SPID.

Tabel 4.37. Spesifikasi respon *transient* pada gerak sway

		SMC	SPID	PID (Default)	PID (Identik)
Delay Time (t_d)	[sec]	0.037	0.037	1.2	2.6
Rise Time (t_r)	[sec]	0.065	0.065	1.5	3
Peak Time (t_p)	[sec]	0.07	0.07	2	3.5
Maximum Peak (M_p)	[m/s]	-1.1	-1.2	-3.4	-3.5
Settling Time (t_s)	[sec]	0.1	0.1	80	inf
Error	[%]	0.11	0.9	13.2	inf

Perbandingan spesifikasi respon *transient* pada gerak sway antara SMC, SPID, PID default dan PID identik pada Tabel 4.37 menunjukkan bahwa error terkecil ketika menggunakan sistem kendali SMC. Terlihat bahwa *delay time*, *rise time*, *peak time* dan *settling time* antara SMC dan SPID hampir sama. Error yang terjadi pada SPID adalah 0.9% dan Error SMC 0.11%, namun untuk PID identik terdapat error *infinity* karena tidak dapat stabil. Untuk PID default mempunyai error 13.2% tetapi dengan *settling time* yang berbeda jauh dengan SMC dan SPID.

Tabel 4.38. Spesifikasi respon *transient* pada gerak heave

		SMC	SPID	PID (Default)	PID (Identik)
Delay Time (t_d)	[sec]	0.045	0.045	1.6	1.5
Rise Time (t_r)	[sec]	0.15	0,25	1.8	1.8
Peak Time (t_p)	[sec]	0	0	2.8	2.2
Maximum Peak (M_p)	[m/s]	0	0	-3.6	-3.8
Settling Time (t_s)	[sec]	0.2	0.25	80	inf
Error	[%]	0.19	0.8	17.3	inf

Perbandingan spesifikasi respon *transient* pada gerak heave antara SMC, SPID, PID default dan PID identik pada Tabel 4.38 tampak bahwa error terkecil ketika menggunakan sistem kendali SMC. Terlihat bahwa *delay time*, *rise time*, *peak time* dan *settling time* antara SMC dan SPID hampir sama. Error yang terjadi pada SPID adalah 0.8% dan Error SMC 0.19%, namun untuk PID identik terdapat error *infinity* karena tidak dapat stabil. Untuk PID default mempunyai error 17.3% tetapi dengan *settling time* yang berbeda jauh dengan SMC dan SPID.

Tabel 4.39. Spesifikasi respon *transient* pada gerak roll

		SMC	SPID	PID (Default)	PID (Identik)
Delay Time (t_d)	[sec]	0.04	0.04	1.05	1
Rise Time (t_r)	[sec]	0.12	0.12	1.3	1.1
Peak Time (t_p)	[sec]	0	0	2.8	3
Maximum Peak (M_p)	[m/s]	0	0	1.2	1.3
Settling Time (t_s)	[sec]	0.12	0.12	40	inf
Error	[%]	0.42	0.6	0.4	inf

Perbandingan spesifikasi respon *transient* pada gerak roll antara SMC, SPID, PID default dan PID identik pada Tabel 4.39 tampak bahwa error terkecil ketika menggunakan system kendali SMC. Terlihat bahwa *delay time*, *rise time*, *peak time* dan *settling time* antara SMC dan SPID hampir sama. Error yang terjadi pada SMC adalah 0.42% dan Error SPID 0.6%, namun untuk PID identik terdapat error *infinity* karena tidak dapat stabil. Untuk PID default mempunyai error 0.4% tetapi dengan *settling time* yang berbeda jauh dengan SMC dan SPID.

Tabel 4.40. Spesifikasi respon *transient* pada gerak pitch

		SMC	SPID	PID (Default)	PID (Identik)
Delay Time (t_d)	[sec]	0.01	0.01	2.2	2,2
Rise Time (t_r)	[sec]	0.02	0.02	2.5	2.5
Peak Time (t_p)	[sec]	0.075	0.074	3.8	3.5
Maximum Peak (M_p)	[m/s]	-5.2	-5.8	-2.8	-3.2
Settling Time (t_s)	[sec]	1.5	1.25	70	inf
Error	[%]	4.58	4.3	8.9	inf

Perbandingan spesifikasi respon *transient* pada gerak pitch antara SMC, SPID, PID default dan PID identik pada Tabel 4.40 menunjukkan bahwa error terkecil ketika menggunakan system kendali SPID. Terlihat bahwa *delay time*, *rise time*, *peak time* dan *settling time* antara SMC dan SPID hampir sama. Error yang terjadi pada SPID adalah 4.3% dan Error SMC 4.58%, namun untuk PID identik terdapat error *infinity* karena tidak dapat stabil. Untuk PID default mempunyai error 8.9% tetapi dengan *settling time* yang berbeda jauh dengan SMC dan SPID.

Tabel 4.41. Spesifikasi respon *transient* pada gerak yaw

		SMC	SPID	PID (Default)	PID (Identik)
Delay Time (t_d)	[sec]	0.002	0.002	1.25	1.2
Rise Time (t_r)	[sec]	0.082	0.082	1.4	1.4
Peak Time (t_p)	[sec]	0.07	0.07	2.8	2.5
Maximum Peak (M_p)	[m/s]	18	21	-3.4	-3.4
Settling Time (t_s)	[sec]	0.2	0.2	60	inf
Error	[%]	3.66	4.77	5.8	inf

Perbandingan spesifikasi respon *transient* pada gerak yaw antara SMC, SPID, PID default dan PID identik pada tabel 4.41 tampak bahwa error terkecil ketika menggunakan system kendali SMC. Terlihat bahwa *delay time*, *rise time*, *peak time* dan *settling time* antara SMC dan SPID hampir sama. Error yang terjadi pada SMC adalah 3.66% dan Error SPID 4.77%, namun untuk PID identik terdapat error *infinity* karena tidak dapat stabil. Untuk PID default mempunyai error 5.8% tetapi dengan *settling time* yang berbeda jauh dengan SMC dan SPID.

Secara keseluruhan hasil analisa sistem kendali menunjukkan bahwa SMC dan SPID lebih baik daripada PID. Setelah dilakukan sistem navigasi dan panduan sebagai kendali posisi serta sistem kendali sebagai kendali kecepatan, selanjutnya akan dilakukan analisa kestabilan untuk sistem kendali SMC, PID dan SPID untuk mengetahui kestabilan sistem non-linier. Sebelum membentuk fungsi kandidat

Lyapunov untuk analisa kestabilan, maka perlu dibentuk persamaan kendali terlebih dahulu agar didapatkan bentuk kestabilannya.

4.9 ANALISA KESTABILAN DENGAN LYAPUNOV

Fungsi Lyapunov menurut (Chareyron dan Wieber, 1999) dibentuk dari energi kinetik dan energi potensial sistem (yang berhubungan dengan kendali posisi). Fungsi Kandidat Lyapunov untuk sistem linier AUV 6-DOF adalah

$$V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 + \frac{1}{2}r^2 \quad (4.178)$$

Akan ditunjukkan bahwa fungsi

$$V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 + \frac{1}{2}r^2$$

merupakan fungsi Lyapunov sesuai definisi pada bab 2 dan kriteria kestabilan sesuai teorema 1 dan teorema 2.

4.9.1 Analisa Kestabilan Lyapunov Sistem Kendali SMC

Fungsi kandidat Lyapunov pada persamaan (4.178) akan dibuktikan bahwa fungsi kandidat tersebut dengan sistem kendali SMC pada model linier merupakan fungsi Lyapunov dan stabil asimtotik.

1. Untuk $(u, v, w, p, q, r) = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$, $V(u, v, w, p, q, r) = 0$, sedangkan untuk $(u, v, w, p, q, r) \neq (0, 0, 0, 0, 0, 0)$, $V(u, v, w, p, q, r) > 0$. Terbukti $V(u, v, w, p, q, r)$ definit positif.
2. Fungsi V kontinu dan mempunyai turunan parsial pertama kontinu pada S fungsi

$$V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 + \frac{1}{2}r^2$$

merupakan fungsi kuadratik, jelas bahwa fungsi kuadratik kontinu. Kemudian turunan parsial juga kontinu.

$$\begin{aligned} 3. \quad \dot{V}(u, v, w, p, q, r) &= \frac{\partial V}{\partial u} \dot{u} + \frac{\partial V}{\partial v} \dot{v} + \frac{\partial V}{\partial w} \dot{w} + \frac{\partial V}{\partial p} \dot{p} + \frac{\partial V}{\partial q} \dot{q} + \frac{\partial V}{\partial r} \dot{r} \\ \dot{V}(u, v, w, p, q, r) &= u\dot{u} + v\dot{v} + w\dot{w} + p\dot{p} + q\dot{q} + r\dot{r} \end{aligned} \quad (4.179)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(u, v, w, p, q, r) &= u(aa_1 u + bb_1 v + cc_1 w + dd_1 p + ee_1 q + gg_1 r + AA_1 X_{prop} \\ &\quad + BB_1 \delta_{r_1} + CC_1 \delta_{s_1} + DD_1 K_{prop} + EE_1 \delta_{s_2} + GG_1 \delta_{r_2}) + \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& v(aa_2 u + bb_2 v + cc_2 w + dd_2 p + ee_2 q + gg_2 r + AA_2 X_{prop} + BB_2 \delta_{r_1} + CC_2 \delta_{s_1} + DD_2 K_{prop} \\
& \quad + EE_2 \delta_{s_2} + GG_2 \delta_{r_2}) + \dots \\
& w(aa_3 u + bb_3 v + cc_3 w + dd_3 p + ee_3 q + gg_3 r + AA_3 X_{prop} + BB_3 \delta_{r_1} + CC_3 \delta_{s_1} \\
& \quad + DD_3 K_{prop} + EE_3 \delta_{s_2} + GG_3 \delta_{r_2}) + \dots \\
& p(aa_4 u + bb_4 v + cc_4 w + dd_4 p + ee_4 q + gg_4 r + AA_4 X_{prop} + BB_4 \delta_{r_1} + CC_4 \delta_{s_1} \\
& \quad + DD_4 K_{prop} + EE_4 \delta_{s_2} + GG_4 \delta_{r_2}) + \dots \\
& q(aa_5 u + bb_5 v + cc_5 w + dd_5 p + ee_5 q + gg_5 r + AA_5 X_{prop} + BB_5 \delta_{r_1} + CC_5 \delta_{s_1} \\
& \quad + DD_5 K_{prop} + EE_5 \delta_{s_2} + GG_5 \delta_{r_2}) + \dots \\
& r(aa_6 u + bb_6 v + cc_6 w + dd_6 p + ee_6 q + gg_6 r + AA_6 X_{prop} + BB_6 \delta_{r_1} + CC_6 \delta_{s_1} + \\
& \quad DD_6 K_{prop} + EE_6 \delta_{s_2} + GG_6 \delta_{r_2})
\end{aligned} \tag{4.180}$$

pilih

$$\begin{aligned}
X_{prop} &= - \left(\frac{aa_1 u + bb_1 v + cc_1 w + dd_1 p + ee_1 q + gg_1 r}{AA_1} \right) - \dots \\
& \left(\frac{BB_1 \delta_{r_1} + CC_1 \delta_{s_1} + DD_1 K_{prop} + EE_1 \delta_{s_2} + GG_1 \delta_{r_2}}{AA_1} \right) - K_1 \operatorname{sgn}(S)
\end{aligned} \tag{4.181}$$

$$\begin{aligned}
\delta_{r_1} &= - \left(\frac{aa_2 u + bb_2 v + cc_2 w + dd_2 p + ee_2 q + gg_2 r}{BB_2} \right) - \dots \\
& \left(\frac{AA_2 X_{prop} + CC_2 \delta_{s_1} + DD_2 K_{prop} + EE_2 \delta_{s_2} + GG_2 \delta_{r_2}}{BB_2} \right) - K_2 \operatorname{sgn}(S)
\end{aligned} \tag{4.182}$$

$$\begin{aligned}
\delta_{s_1} &= - \left(\frac{aa_3 u + bb_3 v + cc_3 w + dd_3 p + ee_3 q + gg_3 r}{CC_3} \right) - \dots \\
& \left(\frac{AA_3 X_{prop} + BB_3 \delta_{r_1} + DD_3 K_{prop} + EE_3 \delta_{s_2} + GG_3 \delta_{r_2}}{CC_3} \right) - K_3 \operatorname{sgn}(S)
\end{aligned} \tag{4.183}$$

$$\begin{aligned}
K_{prop} &= - \left(\frac{aa_4 u + bb_4 v + cc_4 w + dd_4 p + ee_4 q + gg_4 r}{DD_4} \right) - \dots \\
& \left(\frac{AA_4 X_{prop} + BB_4 \delta_{r_1} + CC_4 \delta_{s_1} + EE_4 \delta_{s_2} + GG_4 \delta_{r_2}}{DD_4} \right) - K_4 \operatorname{sgn}(S)
\end{aligned} \tag{4.184}$$

$$\begin{aligned}
\delta_{s_2} &= - \left(\frac{aa_5 u + bb_5 v + cc_5 w + dd_5 p + ee_5 q + gg_5 r}{EE_5} \right) - \dots \\
& \left(\frac{AA_5 X_{prop} + BB_5 \delta_{r_1} + CC_5 \delta_{s_1} + DD_5 K_{prop} + GG_5 \delta_{r_2}}{EE_5} \right) - K_5 \operatorname{sgn}(S)
\end{aligned} \tag{4.185}$$

$$\begin{aligned}
\delta_{r_2} &= - \left(\frac{aa_6 u + bb_6 v + cc_6 w + dd_6 p + ee_6 q + gg_6 r}{GG_6} \right) - \dots \\
& \left(\frac{AA_6 X_{prop} + BB_6 \delta_{r_1} + CC_6 \delta_{s_1} + DD_6 K_{prop} + EE_6 \delta_{s_2}}{GG_6} \right) - K_6 \operatorname{sgn}(S)
\end{aligned} \tag{4.186}$$

Substitusikan persamaan (4.181) – (4.186) ke persamaan (4.180) sehingga diperoleh

$$\dot{V}(u, v, w, p, q, r)$$

$$\begin{aligned} &= u(-AA_1 K_1 \operatorname{sgn}(S)) + v(-BB_2 K_2 \operatorname{sgn}(S)) + w(-CC_3 K_3 \operatorname{sgn}(S)) \\ &+ p(-DD_4 K_4 \operatorname{sgn}(S)) + q(-EE_5 K_5 \operatorname{sgn}(S)) + r(-GG_6 K_6 \operatorname{sgn}(S)) \\ &\leq [-AA_1 K_1][u] + [BB_2 K_2][v] + [-CC_3 K_3][w] + [-DD_4 K_4][p] \\ &+ [-EE_5 K_5][q] + [-GG_6 K_6][r] \end{aligned}$$

$$\text{pilih } K_1 = \left\lfloor \frac{1}{AA_1} \right\rfloor \eta, K_2 = \left\lfloor \frac{1}{BB_2} \right\rfloor \eta, K_3 = \left\lfloor \frac{1}{CC_3} \right\rfloor \eta, K_4 = \left\lfloor \frac{1}{DD_4} \right\rfloor \eta, K_5 = \left\lfloor \frac{1}{EE_5} \right\rfloor \eta, \text{ dan } K_6 = \left\lfloor \frac{1}{GG_6} \right\rfloor \eta$$

$$\text{sehingga didapatkan } \dot{V}(u, v, w, p, q, r) \leq [-\eta]|u| + [-\eta]|v| + [-\eta]|w| + [-\eta]|p| + [-\eta]|q| + [-\eta]|r|$$

$$\dot{V}(u, v, w, p, q, r) \leq -\eta[|u| + |v| + |w| + |p| + |q| + |r|]$$

karena memenuhi syarat diatas dan syarat pada Teorema 1 maka fungsi tersebut

$V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 + \frac{1}{2}r^2$ merupakan fungsi Lyapunov serta merupakan stabil asimtotik.

Pada Teorema 2 terdapat satu syarat yaitu $V(x) \rightarrow \infty$ dengan $\|x\| \rightarrow \infty$ yang jika terpenuhi maka fungsi Lyapunov tersebut stabil asimtotik global. Fungsi Lyapunov diatas adalah $V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 + \frac{1}{2}r^2$. Akan dibuktikan bahwa $V(u, v, w, p, q, r) \rightarrow \infty$ dengan $\|u\| \rightarrow \infty, \|v\| \rightarrow \infty, \|w\| \rightarrow \infty, \|p\| \rightarrow \infty, \|q\| \rightarrow \infty, \text{ dan } \|r\| \rightarrow \infty$, karena $V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 + \frac{1}{2}r^2$ adalah fungsi kuadratik sehingga jika $\|u\| \rightarrow \infty, \|v\| \rightarrow \infty, \|w\| \rightarrow \infty, \|p\| \rightarrow \infty, \|q\| \rightarrow \infty, \text{ dan } \|r\| \rightarrow \infty$, maka $V(u, v, w, p, q, r) \rightarrow \infty$. Sehingga Fungsi Lyapunov $V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 + \frac{1}{2}r^2$ stabil asimtotik global

4.9.2 Analisa Kestabilan Lyapunov Sistem Kendali PID

Sama halnya dengan analisa kestabilan Lyapunov SMC, fungsi kandidat Lyapunov pada persamaan (4.178) akan dibuktikan bahwa fungsi kandidat tersebut dengan sistem kendali PID pada model linier merupakan fungsi Lyapunov dan stabil asimtotik.

1. Untuk $(u, v, w, p, q, r) = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$, $V(u, v, w, p, q, r) = 0$, sedangkan untuk $(u, v, w, p, q, r) \neq (0, 0, 0, 0, 0, 0)$, $V(u, v, w, p, q, r) > 0$. Terbukti $V(u, v, w, p, q, r)$ definit positif
2. Fungsi V kontinu dan mempunyai turunan parsial pertama kontinu pada S
Fungsi

$$V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 + \frac{1}{2}r^2$$

merupakan fungsi kuadrat, jelas bahwa fungsi kuadrat kontinu. Kemudian turunan parsial juga kontinu

3. Sesuai dengan persamaan (4.179) maka dipilih sistem kendali PID sebagai berikut :

$$X_{prop} = K_{p1}u + K_{i1}\frac{1}{2}u^2 + K_{d1}\dot{u}$$

$$\delta_{r_1} = K_{p2}v + K_{i2}\frac{1}{2}v^2 + K_{d2}\dot{v}$$

$$\delta_{s_1} = K_{p3}w + K_{i3}\frac{1}{2}w^2 + K_{d3}\dot{w}$$

$$K_{prop} = K_{p4}p + K_{i4}\frac{1}{2}p^2 + K_{d4}\dot{p}$$

$$\delta_{s_2} = K_{p5}q + K_{i5}\frac{1}{2}q^2 + K_{d5}\dot{q}$$

$$\delta_{r_2} = K_{p6}r + K_{i6}\frac{1}{2}r^2 + K_{d6}\dot{r}$$

Sehingga didapatkan

$$\begin{aligned} \dot{u} &= aa_1 u + bb_1 v + cc_1 w + dd_1 p + ee_1 q + gg_1 r + AA_1 \left(K_{p1}u + K_{i1}\frac{1}{2}u^2 + K_{d1}\dot{u} \right) \\ &+ BB_1 \delta_{r_1} + CC_1 \delta_{s_1} + DD_1 K_{prop} + EE_1 \delta_{s_2} + GG_1 \delta_{r_2} \\ \dot{u}(1 - AA_1 K_{d1}) &= aa_1 u + bb_1 v + cc_1 w + dd_1 p + ee_1 q + gg_1 r + AA_1 \left(K_{p1}u + K_{i1}\frac{1}{2}u^2 \right) \\ &+ BB_1 \delta_{r_1} + CC_1 \delta_{s_1} + DD_1 K_{prop} + EE_1 \delta_{s_2} + GG_1 \delta_{r_2} \\ \dot{u} &= \frac{aa_1 u + bb_1 v + cc_1 w + dd_1 p + ee_1 q + gg_1 r + AA_1 \left(K_{p1}u + K_{i1}\frac{1}{2}u^2 \right) + \dots}{1 - AA_1 K_{d1}} \\ &+ \frac{BB_1 \delta_{r_1} + CC_1 \delta_{s_1} + DD_1 K_{prop} + EE_1 \delta_{s_2} + GG_1 \delta_{r_2}}{1 - AA_1 K_{d1}} \end{aligned} \quad (4.187)$$

$$\begin{aligned} \dot{v} &= aa_2 u + bb_2 v + cc_2 w + dd_2 p + ee_2 q + gg_2 r + AA_2 X_{prop} \\ &+ BB_2 \left(K_{p2}v + K_{i2}\frac{1}{2}v^2 + K_{d2}\dot{v} \right) + CC_2 \delta_{s_1} + DD_2 K_{prop} + EE_2 \delta_{s_2} + GG_2 \delta_{r_2} \\ \dot{v}(1 - BB_2 K_{d2}) &= aa_2 u + bb_2 v + cc_2 w + dd_2 p + ee_2 q + gg_2 r + AA_2 X_{prop} + \dots \\ &+ BB_2 \left(K_{p2}v + K_{i2}\frac{1}{2}v^2 \right) + CC_2 \delta_{s_1} + DD_2 K_{prop} + EE_2 \delta_{s_2} + GG_2 \delta_{r_2} \\ \dot{v} &= \frac{aa_2 u + bb_2 v + cc_2 w + dd_2 p + ee_2 q + gg_2 r + AA_2 X_{prop} + \dots}{1 - BB_2 K_{d2}} \\ &+ \frac{BB_2 \left(K_{p2}v + K_{i2}\frac{1}{2}v^2 \right) + CC_2 \delta_{s_1} + DD_2 K_{prop} + EE_2 \delta_{s_2} + GG_2 \delta_{r_2}}{1 - BB_2 K_{d2}} \end{aligned} \quad (4.188)$$

$$\dot{w} = aa_3 u + bb_3 v + cc_3 w + dd_3 p + ee_3 q + gg_3 r + AA_3 X_{prop} + \dots$$

$$\begin{aligned}
& BB_3 \delta_{r_1} + CC_3 \left(K_{p3} w + K_{i3} \frac{1}{2} w^2 + K_{d3} \dot{w} \right) + DD_3 K_{prop} + EE_3 \delta_{s_2} + GG_3 \delta_{r_2} \\
& \dot{w}(1 - CC_3 K_{d3}) = aa_3 u + bb_3 v + cc_3 w + dd_3 p + ee_3 q + gg_3 r + AA_3 X_{prop} + \dots \\
& BB_3 \delta_{r_1} + CC_3 \left(K_{p3} w + K_{i3} \frac{1}{2} w^2 \right) + DD_3 K_{prop} + EE_3 \delta_{s_2} + GG_3 \delta_{r_2} \\
& \dot{w} = \frac{aa_3 u + bb_3 v + cc_3 w + dd_3 p + ee_3 q + gg_3 r + AA_3 X_{prop}}{1 - CC_3 K_{d3}} + \dots \\
& \frac{BB_3 \delta_{r_1} + CC_3 \left(K_{p3} w + K_{i3} \frac{1}{2} w^2 \right) + DD_3 K_{prop} + EE_3 \delta_{s_2} + GG_3 \delta_{r_2}}{1 - CC_3 K_{d3}} \quad (4.189)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \dot{p} = aa_4 u + bb_4 v + cc_4 w + dd_4 p + ee_4 q + gg_4 r + AA_4 X_{prop} + \dots \\
& BB_4 \delta_{r_1} + CC_4 \delta_{s_1} + DD_4 \left(K_{p4} p + K_{i4} \frac{1}{2} p^2 + K_{d4} \dot{p} \right) + EE_4 \delta_{s_2} + GG_4 \delta_{r_2} \\
& \dot{p}(1 - DD_4 K_{d4}) = aa_4 u + bb_4 v + cc_4 w + dd_4 p + ee_4 q + gg_4 r + AA_4 X_{prop} + \dots \\
& BB_4 \delta_{r_1} + CC_4 \delta_{s_1} + DD_4 \left(K_{p4} p + K_{i4} \frac{1}{2} p^2 \right) + EE_4 \delta_{s_2} + GG_4 \delta_{r_2} \\
& \dot{p} = \frac{aa_4 u + bb_4 v + cc_4 w + dd_4 p + ee_4 q + gg_4 r + AA_4 X_{prop}}{1 - DD_4 K_{d4}} + \dots \\
& \frac{BB_4 \delta_{r_1} + CC_4 \delta_{s_1} + DD_4 \left(K_{p4} p + K_{i4} \frac{1}{2} p^2 \right) + EE_4 \delta_{s_2} + GG_4 \delta_{r_2}}{1 - DD_4 K_{d4}} \quad (4.190)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \dot{q} = aa_5 u + bb_5 v + cc_5 w + dd_5 p + ee_5 q + gg_5 r + \dots \\
& AA_3 X_{prop} + BB_5 \delta_{r_1} + CC_5 \delta_{s_1} + DD_5 K_{prop} + EE_5 \left(K_{p5} q + K_{i5} \frac{1}{2} q^2 + K_{d5} \dot{q} \right) + GG_5 \delta_{r_2} \\
& \dot{q}(1 - EE_5 K_{d5}) = aa_5 u + bb_5 v + cc_5 w + dd_5 p + ee_5 q + gg_5 r + \dots \\
& AA_3 X_{prop} + BB_5 \delta_{r_1} + CC_5 \delta_{s_1} + DD_5 K_{prop} + EE_5 \left(K_{p5} q + K_{i5} \frac{1}{2} q^2 \right) + GG_5 \delta_{r_2} \\
& \dot{q} = \frac{aa_5 u + bb_5 v + cc_5 w + dd_5 p + ee_5 q + gg_5 r}{1 - EE_5 K_{d5}} + \dots \\
& \frac{AA_3 X_{prop} + BB_5 \delta_{r_1} + CC_5 \delta_{s_1} + DD_5 K_{prop} + EE_5 \left(K_{p5} q + K_{i5} \frac{1}{2} q^2 \right) + GG_5 \delta_{r_2}}{1 - EE_5 K_{d5}} \quad (4.191)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \dot{r} = aa_6 u + bb_6 v + cc_6 w + dd_6 p + ee_6 q + gg_6 r + \dots \\
& AA_6 X_{prop} + BB_6 \delta_{r_1} + CC_6 \delta_{s_1} + DD_6 K_{prop} + EE_6 \delta_{s_2} + GG_6 \left(K_{p6} r + K_{i6} \frac{1}{2} r^2 + K_{d6} \dot{r} \right) \\
& \dot{r}(1 - GG_6 K_{d6}) = aa_6 u + bb_6 v + cc_6 w + dd_6 p + ee_6 q + gg_6 r + \dots \\
& AA_6 X_{prop} + BB_6 \delta_{r_1} + CC_6 \delta_{s_1} + DD_6 K_{prop} + EE_6 \delta_{s_2} + GG_6 \left(K_{p6} r + K_{i6} \frac{1}{2} r^2 \right) \\
& \dot{r} = \frac{aa_6 u + bb_6 v + cc_6 w + dd_6 p + ee_6 q + gg_6 r}{1 - GG_6 K_{d6}} + \dots \\
& \frac{AA_6 X_{prop} + BB_6 \delta_{r_1} + CC_6 \delta_{s_1} + DD_6 K_{prop} + EE_6 \delta_{s_2} + GG_6 \left(K_{p6} r + K_{i6} \frac{1}{2} r^2 \right)}{1 - GG_6 K_{d6}} \quad (4.192)
\end{aligned}$$

Substitusikan persamaan (4.187) – (4.192) ke persamaan (4.179) sehingga diperoleh persamaan (4.193) sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
& \dot{V}(u, v, w, p, q, r) \\
&= u \left(\frac{aa_1 u + bb_1 v + cc_1 w + dd_1 p + ee_1 q + gg_1 r + AA_1 (K_{p1} u + K_{i1} \frac{1}{2} u^2)}{1 - AA_1 K_{d1}} \right. \\
&+ \left. \frac{BB_1 \delta_{r1} + CC_1 \delta_{s1} + DD_1 K_{prop} + EE_1 \delta_{s2} + GG_1 \delta_{r2}}{1 - AA_1 K_{d1}} \right) + \dots \\
&v \left(\frac{aa_2 u + bb_2 v + cc_2 w + dd_2 p + ee_2 q + gg_2 r + AA_2 X_{prop}}{1 - BB_2 K_{d2}} + \right. \\
&\left. \frac{BB_2 (K_{p2} v + K_{i2} \frac{1}{2} v^2) + CC_2 \delta_{s1} + DD_2 K_{prop} + EE_2 \delta_{s2} + GG_2 \delta_{r2}}{1 - BB_2 K_{d2}} \right) + \\
&w \left(\frac{aa_3 u + bb_3 v + cc_3 w + dd_3 p + ee_3 q + gg_3 r + AA_3 X_{prop}}{1 - CC_3 K_{d3}} + \right. \\
&\left. \frac{BB_3 \delta_{r1} + CC_3 (K_{p3} w + K_{i3} \frac{1}{2} w^2) + DD_3 K_{prop} + EE_3 \delta_{s2} + GG_3 \delta_{r2}}{1 - CC_3 K_{d3}} \right) + \\
&p \left(\frac{aa_4 u + bb_4 v + cc_4 w + dd_4 p + ee_4 q + gg_4 r + AA_4 X_{prop}}{1 - DD_4 K_{d4}} + \right. \\
&\left. \frac{BB_4 \delta_{r1} + CC_4 \delta_{s1} + DD_4 (K_{p4} p + K_{i4} \frac{1}{2} p^2) + EE_4 \delta_{s2} + GG_4 \delta_{r2}}{1 - DD_4 K_{d4}} \right) + q \left(\frac{aa_5 u + bb_5 v + cc_5 w + dd_5 p + ee_5 q + gg_5 r}{1 - EE_5 K_{d5}} + \right. \\
&\left. \frac{AA_5 X_{prop} + BB_5 \delta_{r1} + CC_5 \delta_{s1} + DD_5 K_{prop} + EE_5 (K_{p5} q + K_{i5} \frac{1}{2} q^2) + GG_5 \delta_{r2}}{1 - EE_5 K_{d5}} \right) + \\
&r \left(\frac{aa_6 u + bb_6 v + cc_6 w + dd_6 p + ee_6 q + gg_6 r}{1 - GG_6 K_{d6}} + \right. \\
&\left. \frac{AA_6 X_{prop} + BB_6 \delta_{r1} + CC_6 \delta_{s1} + DD_6 K_{prop} + EE_6 \delta_{s2} + GG_6 (K_{p6} r + K_{i6} \frac{1}{2} r^2)}{1 - GG_6 K_{d6}} \right) \tag{4.193}
\end{aligned}$$

Karena nilai dari $1 - AA_1 K_{d1} < 0$, $1 - BB_2 K_{d2} < 0$, $1 - CC_3 K_{d3} < 0$,

$1 - DD_4 K_{d4} < 0$, $1 - EE_5 K_{d5} < 0$ dan $1 - GG_6 K_{d6} < 0$

Sehingga didapatkan $\dot{V}(u, v, w, p, q, r) \leq 0$

Karena memenuhi syarat diatas dan syarat pada Teorema 2.6.2 maka fungsi tersebut

$V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 + \frac{1}{2}r^2$ merupakan fungsi

Lyapunov serta merupakan stabil asimtotik.

Pada Teorema 2.6.3 terdapat satu syarat yaitu $V(x) \rightarrow \infty$ dengan $\|x\| \rightarrow \infty$ yang jika terpenuhi maka fungsi Lyapunov tersebut stabil asimtotik global. Fungsi Lyapunov diatas adalah $V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 + \frac{1}{2}r^2$. Akan dibuktikan bahwa $V(u, v, w, p, q, r) \rightarrow \infty$ dengan $\|u\| \rightarrow \infty, \|v\| \rightarrow \infty, \|w\| \rightarrow$

$\infty, \|p\| \rightarrow \infty, \|q\| \rightarrow \infty, \text{ dan } \|r\| \rightarrow \infty$. Karena $V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 + \frac{1}{2}r^2$ adalah fungsi kuadratik sehingga jika $\|u\| \rightarrow \infty, \|v\| \rightarrow \infty, \|w\| \rightarrow \infty, \|p\| \rightarrow \infty, \|q\| \rightarrow \infty, \text{ dan } \|r\| \rightarrow \infty$, maka $V(u, v, w, p, q, r) \rightarrow \infty$. Sehingga Fungsi Lyapunov $V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 + \frac{1}{2}r^2$ stabil asimtotik global

4.9.3 Analisa Kestabilan Lyapunov Sistem Kendali SPID

Sama halnya dengan analisa kestabilan Lyapunov SMC dan PID, fungsi kandidat Lyapunov pada persamaan (4.178) akan dibuktikan bahwa fungsi kandidat tersebut dengan sistem kendali SPID pada model linier merupakan fungsi Lyapunov dan stabil asimtotik.

1. Untuk $(u, v, w, p, q, r) = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$, $V(u, v, w, p, q, r) = 0$, sedangkan untuk $(u, v, w, p, q, r) \neq (0, 0, 0, 0, 0, 0)$, $V(u, v, w, p, q, r) > 0$. Terbukti $V(u, v, w, p, q, r)$ definit positif
2. Fungsi V kontinu dan mempunyai turunan parsial pertama kontinu pada S

fungsi

$$V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 + \frac{1}{2}r^2$$

merupakan fungsi kuadratik, jelas bahwa fungsi kuadratik kontinu. Kemudian turunan parsial juga kontinu

$$3. \quad \dot{V}(u, v, w, p, q, r) = \frac{\partial V}{\partial u} \dot{u} + \frac{\partial V}{\partial v} \dot{v} + \frac{\partial V}{\partial w} \dot{w} + \frac{\partial V}{\partial p} \dot{p} + \frac{\partial V}{\partial q} \dot{q} + \frac{\partial V}{\partial r} \dot{r}$$

$$\dot{V}(u, v, w, p, q, r) = u\dot{u} + v\dot{v} + w\dot{w} + p\dot{p} + q\dot{q} + r\dot{r}$$

$$\dot{V}(u, v, w, p, q, r) = u(aa_1 u + bb_1 v + cc_1 w + dd_1 p + ee_1 q + gg_1 r + AA_1 X_{prop} + BB_1 \delta_{r_1} + CC_1 \delta_{s_1} + DD_1 K_{prop} + EE_1 \delta_{s_2} + GG_1 \delta_{r_2})K_{p1} + \dots$$

$$v(aa_2 u + bb_2 v + cc_2 w + dd_2 p + ee_2 q + gg_2 r + AA_2 X_{prop} + BB_2 \delta_{r_1} + CC_2 \delta_{s_1} + DD_2 K_{prop} + EE_2 \delta_{s_2} + GG_2 \delta_{r_2})K_{p2} + \dots$$

$$w(aa_3 u + bb_3 v + cc_3 w + dd_3 p + ee_3 q + gg_3 r + AA_3 X_{prop} + BB_3 \delta_{r_1} + CC_3 \delta_{s_1} + DD_3 K_{prop} + EE_3 \delta_{s_2} + GG_3 \delta_{r_2})K_{p3} + \dots$$

$$\begin{aligned}
& p(aa_4 u + bb_4 v + cc_4 w + dd_4 p + ee_4 q + gg_4 r + AA_4 X_{prop} + BB_4 \delta_{r_1} + CC_4 \delta_{s_1} \\
& \quad + DD_4 K_{prop} + EE_4 \delta_{s_2} + GG_4 \delta_{r_2}) K_{p4} + \cdots \\
& q(aa_5 u + bb_5 v + cc_5 w + dd_5 p + ee_5 q + gg_5 r + AA_5 X_{prop} + BB_5 \delta_{r_1} + CC_5 \delta_{s_1} \\
& \quad + DD_5 K_{prop} + EE_5 \delta_{s_2} + GG_5 \delta_{r_2}) K_{p5} + \cdots \\
& + r(aa_6 u + bb_6 v + cc_6 w + dd_6 p + ee_6 q + gg_6 r + AA_6 X_{prop} + BB_6 \delta_{r_1} + CC_6 \delta_{s_1} \\
& \quad + DD_6 K_{prop} + EE_6 \delta_{s_2} + GG_6 \delta_{r_2}) K_{p6}
\end{aligned}$$

Kemudian dipilih $X_{prop}, \delta_r, \delta_s, K_{prop}, \delta_s$ dan δ_r pada persamaan (4.181) – (4.186) sehingga diperoleh

$$\begin{aligned}
\dot{V}(u, v, w, p, q, r) &= u(-m_1 K_1 \operatorname{sgn}(S)) + v(-u^2(m_8 Y_{uu\delta_r} + m_{12} N_{uu\delta_r}) K_2 \operatorname{sgn}(S)) \\
&+ w(- (m_{15} Z_{uu\delta_s} + m_{17} M_{uu\delta_s}) u^2 K_3 \operatorname{sgn}(S)) + p(-m_{22} K_4 \operatorname{sgn}(S)) \\
&+ q(- (m_{27} Z_{uu\delta_s} + m_{29} M_{uu\delta_s}) u^2 K_5 \operatorname{sgn}(S)) \\
&+ r(- (m_{32} Y_{uu\delta_r} + m_{36} N_{uu\delta_r}) u^2 K_6 \operatorname{sgn}(S)) \\
&\leq [-m_1 K_1][u] + [-u^2(m_8 Y_{uu\delta_r} + m_{12} N_{uu\delta_r}) K_2][v] \\
&+ [- (m_{15} Z_{uu\delta_s} + m_{17} M_{uu\delta_s}) u^2 K_3][w] + [-m_{22} K_4][p] \\
&+ [- (m_{27} Z_{uu\delta_s} + m_{29} M_{uu\delta_s}) u^2 K_5][q] \\
&+ [- (m_{32} Y_{uu\delta_r} + m_{36} N_{uu\delta_r}) u^2 K_6][r]
\end{aligned}$$

$$\text{Pilih } K_1 = \left| \frac{1}{m_1} \right| \eta$$

$$K_2 = \left| \frac{1}{u^2(m_8 Y_{uu\delta_r} + m_{12} N_{uu\delta_r})} \right| \eta$$

$$K_3 = \left| \frac{1}{(m_{15} Z_{uu\delta_s} + m_{17} M_{uu\delta_s}) u^2} \right| \eta$$

$$K_4 = \left| \max \frac{\eta}{m_{22}} \right|$$

$$K_5 = \left| \frac{1}{(m_{27} Z_{uu\delta_s} + m_{29} M_{uu\delta_s}) u^2} \right| \eta$$

$$K_6 = \left| \frac{1}{(m_{32} Y_{uu\delta_r} + m_{36} N_{uu\delta_r}) u^2} \right| \eta$$

Sehingga didapatkan $\dot{V}(u, v, w, p, q, r) \leq [-\eta]|u| + [-\eta]|v| + [-\eta]|w| + [-\eta]|p| + [-\eta]|q| + [-\eta]|r|$

$$\dot{V}(u, v, w, p, q, r) \leq -\eta[|u| + |v| + |w| + |p| + |q| + |r|]$$

Karena memenuhi syarat diatas dan syarat pada Teorema 2.6.2 maka fungsi tersebut

$V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 + \frac{1}{2}r^2$ merupakan fungsi

Lyapunov serta merupakan stabil asimtotik.

Pada Teorema 2, terdapat satu syarat yaitu $V(x) \rightarrow \infty$ dengan $\|x\| \rightarrow \infty$ yang jika terpenuhi maka fungsi Lyapunov tersbut stabil asimtotik global.

Fungsi Lyapunov diatas adalah $V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 + \frac{1}{2}r^2$. Akan dibuktikan bahwa $V(u, v, w, p, q, r) \rightarrow \infty$ dengan $\|u\| \rightarrow \infty, \|v\| \rightarrow$

$\infty, \|w\| \rightarrow \infty, \|p\| \rightarrow \infty, \|q\| \rightarrow \infty$, dan $\|r\| \rightarrow \infty$. Karena $V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 +$

$\frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 + \frac{1}{2}r^2$ adalah fungsi kuadratik sehingga jika $\|u\| \rightarrow$

$\infty, \|v\| \rightarrow \infty, \|w\| \rightarrow \infty, \|p\| \rightarrow \infty, \|q\| \rightarrow \infty$, dan $\|r\| \rightarrow \infty$, maka $V(u, v, w, p, q, r) \rightarrow$

∞ . Sehingga Fungsi Lyapunov $V(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}v^2 + \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}q^2 +$

$\frac{1}{2}r^2$ stabil asimtotik global. Sehingga analisa kestabilan dari sistem kendali SMC, PID

dan SPID memiliki sifat kestabilan stabil asimtotik global.

Secara keseluruhan capaian dari penelitian ini adalah

1. Metode EnKF-SR memiliki akurasi yang lebih baik 0.2%-0.4% daripada EnKF dan KF untuk sepuluh lintasan.
2. Jika dibandingkan antara EnKF dan KF, maka EnKF memiliki rata-rata akurasi lebih baik 0.2% daripada KF.
3. Metode SMC memiliki kestabilan yang lebih baik dengan error yang lebih kecil sekitar 0.18%-1.3% daripada SPID atau PID. Baik secara error, *settling time*, *delay time* dan maksimum overshoot memiliki nilai lebih baik daripada SPID dan PID.
4. Analisa kestabilan Lyapunov menunjukan bahwa sistem kendali PID, SMC, dan SPID stabil asimtotik global.

Adapun ringkasan secara umum yang didapatkan dari penelitian ini adalah

1. Hasil simulasi sistem navigasi dan panduan berdasarkan perbandingan metode menunjukkan yang paling akurat secara umum adalah metode EnKF-SR, di

mana memiliki tingkat akurasi yang lebih baik 0.2% untuk semua lintasan kecuali lintasan 7 dan 8.

2. berdasarkan perbandingan jumlah ensemble baik dengan EnKF dan EnKF-SR menunjukkan yang paling akurat dengan membangkitkan 300 ensemble untuk lintasan 3, 5, 7, 8 dan 10.
3. Berdasarkan perbandingan lintasan menunjukkan yang paling akurat dengan metode EnKF adalah bahwa lintasan 4 dengan membangkitkan 100 dan 200 ensemble, serta lintasan 3 dengan membangkitkan 300 dan 400 ensemble, dengan metode EnKF-SR adalah lintasan 3 dengan membangkitkan 200 dan 400 ensemble, serta lintasan 6 dengan membangkitkan 100 dan 300 ensemble.
4. Metode SMC memiliki kestabilan yang lebih baik untuk empat gerakan, yaitu sway, heave, roll dan yaw dengan error yang lebih kecil sekitar 0.18%-1.3% daripada SPID. Sedangkan metode SPID memiliki kestabilan lebih baik untuk dua gerakan, yaitu surge dan pitch dengan error yang lebih kecil sekitar 0.2%-0.75% daripada SMC.
5. Metode PID (default) memiliki error sekitar 0.4%–17.3%, sedangkan PID (identik) yang nilai K_p , K_i , K_d sama dengan nilai pada metode SPID memiliki error yang infinity dan belum stabil.
6. Metode sistem navigasi, panduan dan kendali gerak yang direkomendasikan adalah metode EnKF-SR untuk sistem navigasi dan panduan, serta metode SMC untuk kendali gerak.
7. Berdasarkan hasil simulasi menunjukkan bahwa metode SMC, PID dan SPID memiliki respon yang stabil pada titik reference (setpoint) tertentu dan dibuktikan juga oleh analisa kestabilan Lyapunov yang menghasilkan sifat kestabilan asimtotik global.

LAMPIRAN A1 Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF dengan membangkitkan 100, 200 dan 400 ensemble

1. Gerakan lurus

Tabel A1.1. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan lurus dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.087412 m	0.08081 m	0.081953 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m
u	0.014727 m/s	0.0021928 m/s	0.012213 m/s
v	0.0058372 m/s	0.00079759 m/s	0.005569 m/s
w	0.010385 m/s	0.0018829 m/s	0.0093798 m/s
p	0.0022822 rad/s	0.0014752 rad/s	0.0021935 rad/s
q	0.0041521 rad/s	0.0035701 rad/s	0.0043994 rad/s
r	0.00071592rad/s	0.00092072 rad/s	0.00078519 rad/s
Waktu simulasi	5.5579 s	5.5754 s	5.5469 s

Tabel A1.2. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan lurus dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.077434 m	0.07532 m	0.076666 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m
u	0.0094538 m/s	0.0006472 m/s	0.009343 m/s
v	0.0022562 m/s	0.00099908 m/s	0.0051532 m/s
w	0.0046892 m/s	0.0011325 m/s	0.0052701 m/s
p	0.0030518 rad/s	0.0022747 rad/s	0.0029472 rad/s
q	0.0046431 rad/s	0.004488 rad/s	0.0042373 rad/s
r	0.00026163rad/s	0.00008573 rad/s	0.0005749 rad/s
Waktu simulasi	7.5452 s	7.5614 s	7.5313 s

Tabel A1.3. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan lurus dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.087291 m	0.080982 m	0.081745 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m
u	0.013621 m/s	0.00043366 m/s	0.012553 m/s
v	0.0069869 m/s	0.001216 m/s	0.0051514 m/s
w	0.006374 m/s	0.0023702 m/s	0.0073845 m/s
p	0.0030691 rad/s	0.0028334 rad/s	0.002952 rad/s
q	0.0043965 rad/s	0.0046374 rad/s	0.0042748 rad/s
r	0.00076283rad/s	0.00081506 rad/s	0.00085554 rad/s
Waktu simulasi	12.0156 s	12.0673 s	12.0156 s

2. Gerakan belok

Tabel A1.4. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan belok dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.077255 m	0.075476 m	0.076433 m
Posisi Y	0.016448 m	0.013241 m	0.015702 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m
u	0.013258 m/s	0.00021059 m/s	0.012242 m/s
v	0.0026516 m/s	0.00029389 m/s	0.0023643 m/s
w	0.0099399 m/s	0.0020835 m/s	0.0092824 m/s
p	0.0034545 rad/s	0.0030009 rad/s	0.0033701 rad/s
q	0.0047318 rad/s	0.0049487 rad/s	0.0044662 rad/s
r	0.0007694 rad/s	0.00075101 rad/s	0.00085928 rad/s
Waktu simulasi	5.3906	5.4157	5.3906

Tabel A1.5. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan belok dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.073218 m	0.072247 m	0.074735 m
Posisi Y	0.0058236 m	0.0048192 m	0.0060487 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m
u	0.012344 m/s	0.0008455 m/s	0.012436 m/s
v	0.0045968 m/s	0.00060876 m/s	0.0048322 m/s
w	0.0048829 m/s	0.00013948 m/s	0.0054198 m/s
p	0.0028057 rad/s	0.0026316 rad/s	0.0030039 rad/s
q	0.0049658 rad/s	0.0048583 rad/s	0.0046835 rad/s
r	0.0007479 rad/s	0.0007022 rad/s	0.00081489 rad/s
Waktu simulasi	7.4063 s	7.4317 s	7.4063 s

Tabel A1.6. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan belok dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.080694 m	0.076993 m	0.077977 m
Posisi Y	0.011112 m	0.012333 m	0.010532 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m
u	0.013611 m/s	0.00078911 m/s	0.012281 m/s
v	0.0053383 m/s	0.0061278 m/s	0.0052523 m/s
w	0.0095793 m/s	0.00067373 m/s	0.0084513 m/s
p	0.0028789 rad/s	0.0028475 rad/s	0.002854 rad/s
q	0.0044448 rad/s	0.0047968 rad/s	0.0046205 rad/s
r	0.0007919 rad/s	0.0008081 rad/s	0.00073467 rad/s
Waktu simulasi	11.9844	12.1541	11.9844

3. Gerakan *diving*

Tabel A1.7. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan *diving* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.061773 m	0.061024 m	0.068612 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0.02164 m	0.0002282 m	0.013113 m
u	0.011103 m/s	0.0030175 m/s	0.011328 m/s
v	0.0099757 m/s	0.001368 m/s	0.0065411 m/s
w	0.011386 m/s	0.00023605 m/s	0.0114794 m/s
p	0.0031646 rad/s	0.0028225 rad/s	0.003091 rad/s
q	0.0043025 rad/s	0.0041425 rad/s	0.0044987 rad/s
r	0.001881 rad/s	0.0019841 rad/s	0.0013555 rad/s
Waktu simulasi	5.3231 s	5.3347 s	5.3125 s

Tabel A1.8. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan *diving* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.074192 m	0.073278 m	0.075426 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0.00092401 m	0.0005181 m	0.0025477 m
u	0.010909 m/s	0.00016814 m/s	0.0122 m/s
v	0.0058856 m/s	0.0014091 m/s	0.0047974 m/s
w	0.0073901 m/s	0.00037363 m/s	0.0070046 m/s
p	0.0031353 rad/s	0.0029548 rad/s	0.003064 rad/s
q	0.004912 rad/s	0.0046137 rad/s	0.0046249 rad/s
r	0.0008107 rad/s	0.00039128 rad/s	0.00077688 rad/s
Waktu simulasi	7.3243 s	7.3467 s	7.3125 s

Tabel A1.9. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan *diving* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.078533 m	0.077435 m	0.077523 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0.0049002 m	0.00021257 m	0.0044065 m
u	0.012794 m/s	0.0012359 m/s	0.012415 m/s
v	0.0032313 m/s	0.00027892 m/s	0.0043469 m/s
w	0.0078518 m/s	0.00023569 m/s	0.0066218 m/s
p	0.0031092 rad/s	0.0030018 rad/s	0.0030842 rad/s
q	0.0047531 rad/s	0.0045886 rad/s	0.0046186 rad/s
r	0.0008784 rad/s	0.00089016 rad/s	0.00078463 rad/s
Waktu simulasi	11.8594 s	11.8655 s	11.8550 s

4. Gerakan belok *diving*

Tabel A1.10. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan belok dan *diving* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.072227 m	0.072114 m	0.072724 m
Posisi Y	0.0090404 m	0.012837 m	0.010995 m
Posisi Z	0.012347 m	0.00062027 m	0.0082621 m
u	0.011971 m/s	0.00089294 m/s	0.01186 m/s
v	0.0024939 m/s	0.0038356 m/s	0.0025524 m/s
w	0.0041066 m/s	0.0025255 m/s	0.0069534 m/s
p	0.0036524 rad/s	0.0035997 rad/s	0.0039573 rad/s
q	0.0046654 rad/s	0.003888 rad/s	0.0044153 rad/s
r	0.0007239 rad/s	0.0008412 rad/s	0.00091893 rad/s
Waktu simulasi	5.3594	5.3654	5.3474

Tabel A1.11. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan belok dan *diving* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.077216 m	0.076216 m	0.076337 m
Posisi Y	0.0015294 m	0.0085938 m	0.0049686 m
Posisi Z	0.014739 m	0.0039313 m	0.010739 m
u	0.0083603 m/s	0.0041512 m/s	0.0080231 m/s
v	0.0009584 m/s	0.00097276 m/s	0.0057815 m/s
w	0.0082609 m/s	0.00062322 m/s	0.0088172 m/s
p	0.0032296 rad/s	0.0030792 rad/s	0.003128 rad/s
q	0.004282 rad/s	0.0040748 rad/s	0.0042838 rad/s
r	0.00051761rad/s	0.00056956 rad/s	0.00071846 rad/s
Waktu simulasi	7.2813	7.2912	7.2813

Tabel A1.12. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan belok dan *diving* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.082077 m	0.078077 m	0.07954 m
Posisi Y	0.0013588 m	0.011138 m	0.0038704 m
Posisi Z	0.00071287 m	0.0011345 m	0.0012269 m
u	0.013293 m/s	0.0028775 m/s	0.01284 m/s
v	0.0037197 m/s	0.0062112 m/s	0.0053377
w	0.0011569 m/s	0.0011319 m/s	0.0079102 m/s
p	0.002961 rad/s	0.0025653 rad/s	0.002784 rad/s
q	0.0037729 rad/s	0.0038333 rad/s	0.0043958 rad/s
r	0.00057333rad/s	0.00073158 rad/s	0.00077649 rad/s
Waktu simulasi	12.0114	12.0456	12

5. Gerakan memutar

Tabel A1.13. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.040295 m	0.038927 m	0.040546 m
Posisi Y	0.1188 m	0.090251 m	0.11609 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m
u	0.0042156 m/s	0.00038069 m/s	0.028043 m/s
v	0.034025 m/s	0.0054026 m/s	0.0085331 m/s
w	0.0025656 m/s	0.0049221 m/s	0.022902 m/s
p	0.04379 rad/s	0.042444 rad/s	0.043343 rad/s
q	0.0092507 rad/s	0.0096826 rad/s	0.0060364 rad/s
r	0.019565 rad/s	0.015664 rad/s	0.016665 rad/s
Waktu simulasi	5.3594 s	5.3671 s	5.3594 s

Tabel A1.14. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.021278 m	0.019923 m	0.020874 m
Posisi Y	0.12637 m	0.086038 m	0.12101 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m
u	0.03944 m/s	0.0011666 m/s	0.038931
v	0.0040242 m/s	0.0039263 m/s	0.0079211
w	0.030086 m/s	0.001441 m/s	0.024517
p	0.041091 rad/s	0.040675 rad/s	0.04104 rad/s
q	0.0062846 rad/s	0.0089163 rad/s	0.0051209 rad/s
r	0.01395 rad/s	0.013536 rad/s	0.016099 rad/s
Waktu simulasi	7.3321 s	7.3438 s	7.3281 s

Tabel A1.15. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.027445 m	0.025314 m	0.026774 m
Posisi Y	0.12054 m	0.082272 m	0.11614 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m
u	0.038282 m/s	0.0014895 m/s	0.027811 m/s
v	0.0021905 m/s	0.0013768 m/s	0.0050426 m/s
w	0.028276 m/s	0.004439 m/s	0.023772 m/s
p	0.038444 rad/s	0.037556 rad/s	0.040156 rad/s
q	0.0038976 rad/s	0.0060924 rad/s	0.0045533 rad/s
r	0.015236 rad/s	0.014949 rad/s	0.016231 rad/s
Waktu simulasi	12.3979 s	12.4178 s	12.3906 s

6. Gerakan memutar *diving*

Tabel A1.16. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar dan *diving* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.0012489 m	0.0012231 m	0.015077 m
Posisi Y	0.11206 m	0.065772 m	0.10938 m
Posisi Z	0.095792 m	0.00022301 m	0.097396 m
u	0.03153 m/s	0.0073118 m/s	0.021847 m/s
v	0.015629 m/s	0.0047889 m/s	0.012253 m/s
w	0.01715 m/s	0.0069744 m/s	0.033682 m/s
p	0.040994 rad/s	0.040319 rad/s	0.040983 rad/s
q	0.0041125 rad/s	0.00017925 rad/s	0.00077077 rad/s
r	0.018181 rad/s	0.018072 rad/s	0.019632 rad/s
Waktu simulasi	5.2868 s	5.2976 s	5.2813 s

Tabel A1.17. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar dan *diving* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.064673 m	0.064321 m	0.06567 m
Posisi Y	0.13047 m	0.07681 m	0.12276 m
Posisi Z	0.10108 m	0.0028753 m	0.10342 m
u	0.0035162 m/s	0,000021031 m/s	0.022184 m/s
v	0.026508 m/s	0.00084391m/s	0.0092623 m/s
w	0.026256 m/s	0.0027924 m/s	0.026954 m/s
p	0.039289 rad/s	0.038079 rad/s	0.040507 rad/s
q	0.0020449 rad/s	0.0020169 rad/s	0.0021555 rad/s
r	0.01445 rad/s	0.012597 rad/s	0.01681 rad/s
Waktu simulasi	7.2903 s	7.3069 s	7.2813 s

Tabel A1.18. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar dan *diving* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.028999 m	0.027764 m	0.029995 m
Posisi Y	0.12048 m	0.086305 m	0.11721 m
Posisi Z	0.092151 m	0.0051107 m	0.095323 m
u	0.014346 m/s	0.00041632 m/s	0.024834 m/s
v	0.0035777 m/s	0.0031656 m/s	0.0063633 m/s
w	0.024067 m/s	0.001586 m/s	0.023004 m/s
p	0.038197 rad/s	0.037752 rad/s	0.03822 rad/s
q	0.0028129 rad/s	0.0028047 rad/s	0.004141 rad/s
r	0.01275 rad/s	0.012008 rad/s	0.014329 rad/s
Waktu simulasi	11.7605 s	11.7756 s	11.7500 s

7. Gerakan memutar ellips

Tabel A1.19. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.13915 m	0.11258 m	0.1095 m
Posisi Y	0.088603 m	0.12737 m	0.06971 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m
u	0.048296 m/s	0.0014336 m/s	0.0012968 m/s
v	0.033015 m/s	0.0096696 m/s	0.0093398 m/s
w	0.037959 m/s	0.0027199 m/s	0.03382 m/s
p	0.041861 rad/s	0.041528 rad/s	0.040302 rad/s
q	0.0016148 rad/s	0.0029671 rad/s	0.0048035 rad/s
r	0.011288 rad/s	0.011196 rad/s	0.011154 rad/s
Waktu simulasi	5.8019 s	5.8147 s	5.7969 s

Tabel A1.20. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.091976 m	0.086427 m	0.08757 m
Posisi Y	0.037145 m	0.030495 m	0.045322 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m
u	0.024797 m/s	0.0017787 m/s	0.024577 m/s
v	0.016096 m/s	0.00074019 m/s	0.017627 m/s
w	0.010674 m/s	0.0021252 m/s	0.0011902 m/s
p	0.044478 rad/s	0.042645 rad/s	0.046408 rad/s
q	0.0044003 rad/s	0.0058062 rad/s	0.0046916 rad/s
r	0.0099353 rad/s	0.0088272 rad/s	0.0090872 rad/s
Waktu simulasi	7.5512 s	7.5657 s	7.5469 s

Tabel A1.21. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.089534 m	0.086345 m	0.085639 m
Posisi Y	0.047563 m	0.084592 m	0.049515 m
Posisi Z	0 m	0 m	0 m
u	0.024935 m/s	0.0042989 m/s	0.02227 m/s
v	0.0028582 m/s	0.002954 m/s	0.0070674 m/s
w	0.0010774 m/s	0.00047696 m/s	0.0045938 m/s
p	0.048707 rad/s	0.047989 rad/s	0.046404 rad/s
q	0.0063531 rad/s	0.007839 rad/s	0.0045531 rad/s
r	0.0097223 rad/s	0.0097475 rad/s	0.0097214 rad/s
Waktu simulasi	12.3011 s	12.3125 s	12.2969 s

8. Gerakan memutar ellips *diving*

Tabel A1.22. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.11786 m	0.09982 m	0.1088 m
Posisi Y	0.011185 m	0.10662 m	0.031942 m
Posisi Z	0.059106 m	0.0014701 m	0.056432 m
u	0.05294 m/s	0.011583 m/s	0.038462 m/s
v	0.010717 m/s	0.012993 m/s	0.0157474 m/s
w	0.010994 m/s	0.0013179 m/s	0.0080455 m/s
p	0.045035 rad/s	0.043942 rad/s	0.044675 rad/s
q	0.0065931 rad/s	0.0053329 rad/s	0.0056822 rad/s
r	0.0082956 rad/s	0.0096993 rad/s	0.0094424 rad/s
Waktu simulasi	5.3198 s	5.3286 s	5.3125 s

Tabel A1.23. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.098797 m	0.095642 m	0.098868 m
Posisi Y	0.052029 m	0.051691 m	0.05234 m
Posisi Z	0.10366 m	0.0026281 m	0.09187 m
u	0.012145 m/s	0.0010079 m/s	0.014964 m/s
v	0.011182 m/s	0.0027767 m/s	0.01423 m/s
w	0.011193 m/s	0.0029869 m/s	0.014169 m/s
p	0.046227 rad/s	0.045292 rad/s	0.046743 rad/s
q	0.0032314 rad/s	0.0030821 rad/s	0.0036388 rad/s
r	0.0077665 rad/s	0.0065695 rad/s	0.0089321 rad/s
Waktu simulasi	7.3643 s	7.3704 s	7.3594 s

Tabel A1.24. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.061894 m	0.061765 m	0.072631 m
Posisi Y	0.076813 m	0.10029 m	0.065785 m
Posisi Z	0.072952 m	0.001977 m	0.076571 m
u	0.018269 m/s	0.0032417 m/s	0.020566 m/s
v	0.0020388 m/s	0.0059725 m/s	0.001964 m/s
w	0.012442 m/s	0.0042058 m/s	0.0046652 m/s
p	0.047246 rad/s	0.045062 rad/s	0.045101 rad/s
q	0.0027325 rad/s	0.002047 rad/s	0.0031384 rad/s
r	0.0073455 rad/s	0.0085426 rad/s	0.0044161 rad/s
Waktu simulasi	11.8035 s	11.8114 s	11.7969 s

9. Gerakan *diving emerging*

Tabel A1.25 Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.088665 m	0.085754 m	0.086853 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0.032503 m	0.00080876 m	0.033027 m
u	0.015837 m/s	0.00018716 m/s	0.019271 m/s
v	0.0054008 m/s	0.00017894 m/s	0.0036876 m/s
w	0.002783 m/s	0.00025892 m/s	0.0060515 m/s
p	0.00075109rad/s	0.0004123 rad/s	0.00041274 rad/s
q	0.005186 rad/s	0.0051557 rad/s	0.0052786 rad/s
r	0.0028914 rad/s	0.0031475 rad/s	0.0026321 rad/s
Waktu simulasi	5.2645 s	5.342 s	5.2500 s

Tabel A1.26. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.096864 m	0.09025 m	0.093409 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0.029673 m	0.0029538 m	0.03007 m
u	0.017363 m/s	0.00022272 m/s	0.017043 m/s
v	0.0050888 m/s	0.00084333 m/s	0.0023214 m/s
w	0.0074992 m/s	0.00080289 m/s	0.0068036 m/s
p	0.00099982rad/s	0.00090556 rad/s	0.00091826 rad/s
q	0.0049291 rad/s	0.0045978 rad/s	0.0048509 rad/s
r	0.0028395 rad/s	0.0029408 rad/s	0.0025909 rad/s
Waktu simulasi	7.3281 s	7.3541 s	7.3143 s

Tabel A1.27. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.081576 m	0.08024 m	0.082281 m
Posisi Y	0 m	0 m	0 m
Posisi Z	0.023414 m	0.00095117 m	0.026513 m
u	0.017651 m/s	0.00062986 m/s	0.01872 m/s
v	0.00015368 m/s	0.0017059 m/s	0.00023502 m/s
w	0.0073299 m/s	0.000027984 m/s	0.0064664 m/s
p	0.00046161rad/s	0.00045067 rad/s	0.00047038 rad/s
q	0.0054937 rad/s	0.0052026 rad/s	0.0053926 rad/s
r	0.0030184 rad/s	0.0032469 rad/s	0.0026755 rad/s
Waktu simulasi	11.7925 s	11.8021 s	11.7813 s

10. Gerakan *diving emerging* belok

Tabel A1.28. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF pada gerakan *diving, emerging* dan belok dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.11416 m	0.0985 m	0.1024 m
Posisi Y	0.021905 m	0.017939 m	0.019383 m
Posisi Z	0.03065 m	0.0021883 m	0.029652 m
u	0.017738 m/s	0.0011475 m/s	0.019838 m/s
v	0.005794 m/s	0.0006709 m/s	0.0022239 m/s
w	0.013378 m/s	0.00011926 m/s	0.0083499 m/s
p	0.0003257 rad/s	0.00016015 rad/s	0.00058249 rad/s
q	0.0051334 rad/s	0.005017 rad/s	0.0051271 rad/s
r	0.0032202 rad/s	0.0028384 rad/s	0.002946 rad/s
Waktu simulasi	5.2986 s	5.3125 s	5.2813 s

Tabel A1.29. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF pada gerakan *diving, emerging* dan belok dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.08557 m	0.08354 m	0.084588 m
Posisi Y	0.0058302 m	0.012912 m	0.010345 m
Posisi Z	0.033882 m	0.00093288 m	0.031291 m
u	0.016925 m/s	0.0014906 m/s	0.015673 m/s
v	0.0023743 m/s	0.00285475 m/s	0.003382 m/s
w	0.0097233 m/s	0.002032 m/s	0.0079175 m/s
p	0.00069018 rad/s	0.00046831 rad/s	0.0005296 rad/s
q	0.0053848 rad/s	0.0051148 rad/s	0.0056539 rad/s
r	0.0022973 rad/s	0.0023121 rad/s	0.0024731 rad/s
Waktu simulasi	7.3658 s	7.3781 s	7.3594 s

Tabel A1.30. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF pada gerakan *diving, emerging* dan belok dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble		
	EnKF	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.084796 m	0.082796 m	0.083936 m
Posisi Y	0.019127 m	0.016755 m	0.018962 m
Posisi Z	0.024307 m	0.00092496 m	0.027098 m
u	0.018913 m/s	0.000066838 m/s	0.019104 m/s
v	0.005284 m/s	0.0013083 m/s	0.0047685 m/s
w	0.0052475 m/s	0.0001266 m/s	0.0047809 m/s
p	0.00083552 rad/s	0.0005804 rad/s	0.00070354 rad/s
q	0.0051604 rad/s	0.0047075 rad/s	0.0052332 rad/s
r	0.0030122 rad/s	0.0026959 rad/s	0.00274 rad/s
Waktu simulasi	12.5237 s	12.5313 s	12.5156 s

LAMPIRAN A2 Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR

1. Gerakan lurus

Tabel A2.1. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan lurus dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.087412 m	0.08081 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.014727 m/s	0.0021928 m/s
v	0.0058372 m/s	0.00079759 m/s
w	0.010385 m/s	0.0018829 m/s
p	0.0022822 rad/s	0.0014752 rad/s
q	0.0041521 rad/s	0.0035701 rad/s
r	0.0007159 rad/s	0.00092072 rad/s
Waktu simulasi	5.5579 s	5.5754 s

Tabel A2.2. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan lurus dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.077434 m	0.07532 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.0094538 m/s	0.0006472 m/s
v	0.0022562 m/s	0.00099908 m/s
w	0.0046892 m/s	0.0011325 m/s
p	0.0030518 rad/s	0.0022747 rad/s
q	0.0046431 rad/s	0.004488 rad/s
r	0.00026163 rad/s	0.00008573 rad/s
Waktu simulasi	7.5452 s	7.5614 s

Tabel A2.3. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan lurus dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.066126 m	0.065861 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.011394 m/s	0.002067 m/s
v	0.003339 m/s	0.0011836 m/s
w	0.0075713 m/s	0.00067742 m/s
p	0.003224 rad/s	0.0031887 rad/s
q	0.004631 rad/s	0.0043029 rad/s
r	0.001224 rad/s	0.0010264 rad/s
Waktu simulasi	9.7856 s	9.7987 s

Tabel A2.4. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan lurus dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.087291 m	0.080982 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.013621 m/s	0.00043366 m/s
v	0.0069869 m/s	0.001216 m/s
w	0.006374 m/s	0.0023702 m/s
p	0.0030691 rad/s	0.0028334 rad/s
q	0.0043965 rad/s	0.0046374 rad/s
r	0.00076283rad/s	0.00081506 rad/s
Waktu simulasi	12.0156 s	12.0673 s

2. Gerakan belok

Tabel A2.5. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan belok dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.077255 m	0.075476 m
Posisi Y	0.016448 m	0.013241 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.013258 m/s	0.00021059 m/s
v	0.0026516 m/s	0.00029389 m/s
w	0.0099399 m/s	0.0020835 m/s
p	0.0034545 rad/s	0.0030009 rad/s
q	0.0047318 rad/s	0.0049487 rad/s
r	0.00076944rad/s	0.00075101 rad/s
Waktu simulasi	5.3906	5.4157

Tabel A2.6. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan belok dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.073218 m	0.072247 m
Posisi Y	0.0058236 m	0.0048192 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.012344 m/s	0.0008455 m/s
v	0.0045968 m/s	0.00060876 m/s
w	0.0048829 m/s	0.00013948 m/s
p	0.0028057 rad/s	0.0026316 rad/s
q	0.0049658 rad/s	0.0048583 rad/s
r	0.0007479 rad/s	0.0007022 rad/s
Waktu simulasi	7.4063 s	7.4317 s

Tabel A2.7. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan belok dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.082101 m	0.078191 m
Posisi Y	0.0053399 m	0.0089068 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.010617 m/s	0.00093253 m/s
v	0.0023712 m/s	0.0033185 m/s
w	0.0092089 m/s	0.002917 m/s
p	0.0027291 rad/s	0.0020728 rad/s
q	0.0045952 rad/s	0.0045544 rad/s
r	0.00058487 rad/s	0.00058715 rad/s
Waktu simulasi	10.0625 s	10.0983 s

Tabel A2.8. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan belok dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.080694 m	0.076993 m
Posisi Y	0.011112 m	0.012333 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.013611 m/s	0.00078911 m/s
v	0.0053383 m/s	0.0061278 m/s
w	0.0095793 m/s	0.00067373 m/s
p	0.0028789 rad/s	0.0028475 rad/s
q	0.0044448 rad/s	0.0047968 rad/s
r	0.0007919 rad/s	0.00080815 rad/s
Waktu simulasi	11.9844	12.1541

3. Gerakan *diving*

Tabel A2.9. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan *diving* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.061773 m	0.061024 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.02164 m	0.0002282 m
u	0.011103 m/s	0.0030175 m/s
v	0.0099757 m/s	0.001368 m/s
w	0.011386 m/s	0.00023605 m/s
p	0.0031646 rad/s	0.0028225 rad/s
q	0.0043025 rad/s	0.0041425 rad/s
r	0.001881	0.0019841 rad/s
Waktu simulasi	5.3231 s	5.3347 s

Tabel A2.10. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan *diving* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.074192 m	0.073278 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.00092401 m	0.0005181 m
u	0.010909 m/s	0.00016814 m/s
v	0.0058856 m/s	0.0014091 m/s
w	0.0073901 m/s	0.00037363 m/s
p	0.0031353 rad/s	0.0029548 rad/s
q	0.004912 rad/s	0.0046137 rad/s
r	0.00081072rad/s	0.00039128 rad/s
Waktu simulasi	7.3243 s	7.3467 s

Tabel A2.11. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan *diving* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.077111 m	0.077115 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.0015987 m	0.001201 m
u	0.0095598 m/s	0.00073222 m/s
v	0.007583 m/s	0.0021067 m/s
w	0.0059214 m/s	0.00031637 m/s
p	0.0029775 rad/s	0.0027345 rad/s
q	0.0045034 rad/s	0.0044188 rad/s
r	0.00072153rad/s	0.00063406 rad/s
Waktu simulasi	9.4611 s	9.4741 s

Tabel A2.12. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan *diving* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.078533 m	0.077435 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.0049002 m	0.00021257 m
u	0.012794 m/s	0.0012359 m/s
v	0.0032313 m/s	0.00027892 m/s
w	0.0078518 m/s	0.00023569 m/s
p	0.0031092 rad/s	0.0030018 rad/s
q	0.0047531 rad/s	0.0045886 rad/s
r	0.0008784 rad/s	0.00089016 rad/s
Waktu simulasi	11.8594 s	11.8655 s

4. Gerakan belok *diving*

Tabel A2.13. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan belok dan *diving* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.072227 m	0.072114 m
Posisi Y	0.0090404 m	0.012837 m
Posisi Z	0.012347 m	0.00062027 m
u	0.011971 m/s	0.00089294 m/s
v	0.0024939 m/s	0.0038356 m/s
w	0.0041066 m/s	0.0025255 m/s
p	0.0036524 rad/s	0.0035997 rad/s
q	0.0046654 rad/s	0.003888 rad/s
r	0.0007239 rad/s	0.0008412 rad/s
Waktu simulasi	5.3594	5.3654

Tabel A2.14. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan belok dan *diving* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.077216 m	0.076216 m
Posisi Y	0.0015294 m	0.0085938 m
Posisi Z	0.014739 m	0.0039313 m
u	0.0083603 m/s	0.0041512 m/s
v	0.0009584 m/s	0.00097276 m/s
w	0.0082609 m/s	0.00062322 m/s
p	0.0032296 rad/s	0.0030792 rad/s
q	0.004282 rad/s	0.0040748 rad/s
r	0.00051761 rad/s	0.00056956 rad/s
Waktu simulasi	7.2813	7.2912

Tabel A2.15. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan belok dan *diving* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.088299 m	0.082299 m
Posisi Y	0.01098 m	0.010612 m
Posisi Z	0.0039679 m	0.0015547 m
u	0.012743 m/s	0.00031244 m/s
v	0.00616 m/s	0.00026765 m/s
w	0.0086723 m/s	0.0018985 m/s
p	0.003099 rad/s	0.0029538 rad/s
q	0.0047435 rad/s	0.0044007 rad/s
r	0.00091753 rad/s	0.00064506 rad/s
Waktu simulasi	9.6132	9.6231

Tabel A2.16. Perbandingan RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan belok dan *diving* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.082077 m	0.078077 m
Posisi Y	0.0013588 m	0.011138 m
Posisi Z	0.00071287 m	0.0011345 m
u	0.013293 m/s	0.0028775 m/s
v	0.0037197 m/s	0.0062112 m/s
w	0.0011569 m/s	0.0011319 m/s
p	0.002961 rad/s	0.0025653 rad/s
q	0.0037729 rad/s	0.0038333 rad/s
r	0.00057333 rad/s	0.00073158 rad/s
Waktu simulasi	12.0114	12.0456

5. Gerakan memutar

Tabel A2.17. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan memutar dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.040295 m	0.038927 m
Posisi Y	0.1188 m	0.090251 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.0042156 m/s	0.00038069 m/s
v	0.034025 m/s	0.0054026 m/s
w	0.0025656 m/s	0.0049221 m/s
p	0.04379 rad/s	0.042444 rad/s
q	0.0092507 rad/s	0.0096826 rad/s
r	0.019565 rad/s	0.015664 rad/s
Waktu simulasi	5.3594 s	5.3671 s

Tabel A2.18. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan memutar dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.021278 m	0.019923 m
Posisi Y	0.12637 m	0.086038 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.03944 m/s	0.0011666 m/s
v	0.0040242 m/s	0.0039263 m/s
w	0.030086 m/s	0.001441 m/s
p	0.041091 rad/s	0.040675 rad/s
q	0.0062846 rad/s	0.0089163 rad/s
r	0.01395 rad/s	0.013536 rad/s
Waktu simulasi	7.3321 s	7.3438 s

Tabel A2.19. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan memutar dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.030961 m	0.028256 m
Posisi Y	0.096866 m	0.061261 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.019529 m/s	0.0015657 m/s
v	0.019982 m/s	0.002988 m/s
w	0.039347 m/s	0.00073722 m/s
p	0.039746 rad/s	0.039366 rad/s
q	0.0025489 rad/s	0.0021008 rad/s
r	0.017597 rad/s	0.01648 rad/s
Waktu simulasi	9.5397 s	9.5534 s

Tabel A2.20. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan memutar dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.027445 m	0.025314 m
Posisi Y	0.12054 m	0.082272 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.038282 m/s	0.0014895 m/s
v	0.0021905 m/s	0.0013768 m/s
w	0.028276 m/s	0.004439 m/s
p	0.038444 rad/s	0.037556 rad/s
q	0.0038976 rad/s	0.0060924 rad/s
r	0.015236 rad/s	0.014949 rad/s
Waktu simulasi	12.3979 s	12.4178 s

6. Gerakan memutar *diving*

Tabel A2.21. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan memutar dan *diving* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.0012489 m	0.0012231 m
Posisi Y	0.11206 m	0.065772 m
Posisi Z	0.095792 m	0.00022301 m
u	0.03153 m/s	0.0073118 m/s
v	0.015629 m/s	0.0047889 m/s
w	0.01715 m/s	0.0069744 m/s
p	0.040994 rad/s	0.040319 rad/s
q	0.0041125 rad/s	0.00017925 rad/s
r	0.018181 rad/s	0.018072 rad/s
Waktu simulasi	5.2868 s	5.2976 s

Tabel A2.22. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan memutar dan *diving* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.064673 m	0.064321 m
Posisi Y	0.13047 m	0.07681 m
Posisi Z	0.10108 m	0.0028753 m
u	0.0035162 m/s	0.000021031 m/s
v	0.026508 m/s	0.0008439 m/s
w	0.026256 m/s	0.0027924 m/s
p	0.039289 rad/s	0.038079 rad/s
q	0.0020449 rad/s	0.0020169 rad/s
r	0.01445 rad/s	0.012597 rad/s
Waktu simulasi	7.2903 s	7.3069 s

Tabel A2.23. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan memutar dan *diving* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.019216 m	0.019011 m
Posisi Y	0.13108 m	0.099115 m
Posisi Z	0.088234 m	0.0023812 m
u	0.0094504 m/s	0.0033908 m/s
v	0.010827 m/s	0.00085586 m/s
w	0.022799 m/s	0.0022694 m/s
p	0.041029 rad/s	0.040851 rad/s
q	0.0028695 rad/s	0.0023867 rad/s
r	0.016837 rad/s	0.016187 rad/s
Waktu simulasi	9.4421 s	9.4531 s

Tabel A2.24. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan memutar dan *diving* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.028999 m	0.027764 m
Posisi Y	0.12048 m	0.086305 m
Posisi Z	0.092151 m	0.0051107 m
u	0.014346 m/s	0.00041632 m/s
v	0.0035777 m/s	0.0031656 m/s
w	0.024067 m/s	0.001586 m/s
p	0.038197 rad/s	0.037752 rad/s
q	0.0028129 rad/s	0.0028047 rad/s
r	0.01275 rad/s	0.012008 rad/s
Waktu simulasi	11.7605 s	11.7756 s

7. Gerakan memutar ellips

Tabel A2.25. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan memutar ellips dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.13915 m	0.11258 m
Posisi Y	0.088603 m	0.12737 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.048296 m/s	0.0014336 m/s
v	0.033015 m/s	0.0096696 m/s
w	0.037959 m/s	0.0027199 m/s
p	0.041861 rad/s	0.041528 rad/s
q	0.0016148 rad/s	0.0029671 rad/s
r	0.011288 rad/s	0.011196 rad/s
Waktu simulasi	5.8019 s	5.8147 s

Tabel A2.26. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan memutar ellips dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.091976 m	0.086427 m
Posisi Y	0.037145 m	0.030495 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.024797 m/s	0.0017787 m/s
v	0.016096 m/s	0.00074019 m/s
w	0.010674 m/s	0.0021252 m/s
p	0.044478 rad/s	0.042645 rad/s
q	0.0044003 rad/s	0.0058062 rad/s
r	0.0099353 rad/s	0.0088272 rad/s
Waktu simulasi	7.5512 s	7.5657 s

Tabel A2.27. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan memutar ellips dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.087656 m	0.084656 m
Posisi Y	0.037451 m	0.082726 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.020948 m/s	0.0047687 m/s
v	0.0030223 m/s	0.0038582 m/s
w	0.017993 m/s	0.00028394 m/s
p	0.048071 rad/s	0.04768 rad/s
q	0.002565 rad/s	0.001367 rad/s
r	0.0090159 rad/s	0.0099498 rad/s
Waktu simulasi	9.9134 s	9.9219 s

Tabel A2.28. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan memutar ellips dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.089534 m	0.086345 m
Posisi Y	0.047563 m	0.084592 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.024935 m/s	0.0042989 m/s
v	0.0028582 m/s	0.002954 m/s
w	0.0010774 m/s	0.00047696 m/s
p	0.048707 rad/s	0.047989 rad/s
q	0.0063531 rad/s	0.007839 rad/s
r	0.0097223 rad/s	0.0097475 rad/s
Waktu simulasi	12.3011 s	12.3125 s

8. Gerakan memutar ellips *diving*

Tabel A2.29. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.11786 m	0.09982 m
Posisi Y	0.011185 m	0.10662 m
Posisi Z	0.059106 m	0.0014701 m
u	0.05294 m/s	0.011583 m/s
v	0.010717 m/s	0.012993 m/s
w	0.010994 m/s	0.0013179 m/s
p	0.045035 rad/s	0.043942 rad/s
q	0.0065931 rad/s	0.0053329 rad/s
r	0.0082956 rad/s	0.0096993 rad/s
Waktu simulasi	5.3198 s	5.3286 s

Tabel A2.30. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.098797 m	0.095642 m
Posisi Y	0.052029 m	0.051691 m
Posisi Z	0.10366 m	0.0026281 m
u	0.012145 m/s	0.0010079 m/s
v	0.011182 m/s	0.0027767 m/s
w	0.011193 m/s	0.0029869 m/s
p	0.046227 rad/s	0.045292 rad/s
q	0.0032314 rad/s	0.0030821 rad/s
r	0.0077665 rad/s	0.0065695 rad/s
Waktu simulasi	5.3643	5.3704

Tabel A2.31. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.10085 m	0.09085 m
Posisi Y	0.066966 m	0.088279 m
Posisi Z	0.061858 m	0.0003838 m
u	0.015574 m/s	0.00095652 m/s
v	0.0033427 m/s	0.002807 m/s
w	0.014337 m/s	0.0025077 m/s
p	0.047874 rad/s	0.044902 rad/s
q	0.0023527 rad/s	0.0016995 rad/s
r	0.0094595 rad/s	0.011352 rad/s
Waktu simulasi	9.6312 s	9.6406 s

Tabel A2.32. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.061894 m	0.061765 m
Posisi Y	0.076813 m	0.10029 m
Posisi Z	0.072952 m	0.001977 m
u	0.018269 m/s	0.0032417 m/s
v	0.0020388 m/s	0.0059725 m/s
w	0.012442 m/s	0.0042058 m/s
p	0.047246 rad/s	0.045062 rad/s
q	0.0027325 rad/s	0.002047 rad/s
r	0.0073455 rad/s	0.0085426 rad/s
Waktu simulasi	11.8035 s	11.8114 s

9. Gerakan *diving emerging*

Tabel A2.33. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.088665 m	0.085754 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.032503 m	0.00080876 m
u	0.015837 m/s	0.00018716 m/s
v	0.0054008 m/s	0.00017894 m/s
w	0.002783 m/s	0.00025892 m/s
p	0.00075109 rad/s	0.0004123 rad/s
q	0.005186 rad/s	0.0051557 rad/s
r	0.0028914 rad/s	0.0031475 rad/s
Waktu simulasi	5.2645 s	5.342 s

Tabel A2.34. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.096864 m	0.09025 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.029673 m	0.0029538 m
u	0.017363 m/s	0.00022272 m/s
v	0.0050888 m/s	0.00084333 m/s
w	0.0074992 m/s	0.00080289 m/s
p	0.00099982 rad/s	0.00090556 rad/s
q	0.0049291 rad/s	0.0045978 rad/s
r	0.0028395 rad/s	0.0029408 rad/s
Waktu simulasi	7.3281 s	7.3541 s

Tabel A2.35. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.08129 m	0.08113 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.028506 m	0.0012287 m
u	0.019577 m/s	0.0011039 m/s
v	0.0038952 m/s	0.00076356 m/s
w	0.0045796 m/s	0.0010807 m/s
p	0.0007266 rad/s	0.0007197 rad/s
q	0.0056279 rad/s	0.0053294 rad/s
r	0.0031758 rad/s	0.0032326 rad/s
Waktu simulasi	9.5114 s	9.5178 s

Tabel A2.36. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.081576 m	0.08024 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.023414 m	0.00095117 m
u	0.017651 m/s	0.00062986 m/s
v	0.00015368 m/s	0.0017059 m/s
w	0.0073299 m/s	0.000027984 m/s
p	0.00046161 rad/s	0.00045067 rad/s
q	0.0054937 rad/s	0.0052026 rad/s
r	0.0030184 rad/s	0.0032469 rad/s
Waktu simulasi	11.7925 s	11.8021 s

10. Gerakan *diving*, *emerging* dan belok

Tabel A2.37. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR pada gerakan *diving*, *emerging* dan belok dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.11416 m	0.0985 m
Posisi Y	0.021905 m	0.017939 m
Posisi Z	0.03065 m	0.0021883 m
u	0.017738 m/s	0.0011475 m/s
v	0.005794 m/s	0.0006709 m/s
w	0.013378 m/s	0.00011926 m/s
p	0.0003257 rad/s	0.00016015 rad/s
q	0.0051334 rad/s	0.005017 rad/s
r	0.0032202 rad/s	0.0028384 rad/s
Waktu simulasi	5.2986 s	5.3125 s

Tabel A2.38. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR pada gerakan *diving*, *emerging* dan belok dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.08557 m	0.08354 m
Posisi Y	0.0058302 m	0.012912 m
Posisi Z	0.033882 m	0.00093288 m
u	0.016925 m/s	0.0014906 m/s
v	0.0023743 m/s	0.00285475 m/s
w	0.0097233 m/s	0.002032 m/s
p	0.00069018rad/s	0.00046831 rad/s
q	0.0053848 rad/s	0.0051148 rad/s
r	0.0022973 rad/s	0.0023121 rad/s
Waktu simulasi	7.3658 s	7.3781 s

Tabel A2.39. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR pada gerakan *diving*, *emerging* dan belok dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.081629 m	0.081543 m
Posisi Y	0.02043 m	0.015477 m
Posisi Z	0.021238 m	0.00027214 m
u	0.016344 m/s	0.00041528 m/s
v	0.00084405 m/s	0.00032958 m/s
w	0.0088313 m/s	0.0018121 m/s
p	0.00035229rad/s	0.0001419 rad/s
q	0.0051192 rad/s	0.0050567 rad/s
r	0.002365 rad/s	0.0019399 rad/s
Waktu simulasi	9.7656 s	9.7987 s

Tabel A2.40. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan EnKF-SR pada gerakan *diving*, *emerging* dan belok dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	EnKF-SR
Posisi X	0.084796 m	0.082796 m
Posisi Y	0.019127 m	0.016755 m
Posisi Z	0.024307 m	0.00092496 m
u	0.018913 m/s	0.000066838 m/s
v	0.005284 m/s	0.0013083 m/s
w	0.0052475 m/s	0.0001266 m/s
p	0.00083552rad/s	0.0005804 rad/s
q	0.0051604 rad/s	0.0047075 rad/s
r	0.0030122 rad/s	0.0026959 rad/s
Waktu simulasi	12.5237 s	12.5313 s

LAMPIRAN A3 Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF

1. Gerakan lurus

Tabel A3.1. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan lurus dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.087412 m	0.081953 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.014727 m/s	0.012213 m/s
v	0.0058372 m/s	0.005569 m/s
w	0.010385 m/s	0.0093798 m/s
p	0.0022822 rad/s	0.0021935 rad/s
q	0.0041521 rad/s	0.0043994 rad/s
r	0.00071592 rad/s	0.00078519 rad/s
Waktu simulasi	5.5579 s	5.5469 s

Tabel A3.2. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan lurus dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.077434 m	0.076666 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.0094538 m/s	0.009343 m/s
v	0.0022562 m/s	0.0051532 m/s
w	0.0046892 m/s	0.0052701 m/s
p	0.0030518 rad/s	0.0029472 rad/s
q	0.0046431 rad/s	0.0042373 rad/s
r	0.0002616 rad/s	0.0005749 rad/s
Waktu simulasi	7.5452 s	7.5313 s

Tabel A3.3. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan lurus dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.066126 m	0.070336 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.011394 m/s	0.011713 m/s
v	0.003339 m/s	0.0036542 m/s
w	0.0075713 m/s	0.0078194 m/s
p	0.003224 rad/s	0.0032532 rad/s
q	0.004631 rad/s	0.0046969 rad/s
r	0.001224 rad/s	0.0017552 rad/s
Waktu simulasi	9.7856 s	9.7613 s

Tabel A3.4. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan lurus dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.087291 m	0.081745 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.013621 m/s	0.012553 m/s
v	0.0069869 m/s	0.0051514 m/s
w	0.006374 m/s	0.0073845 m/s
p	0.0030691 rad/s	0.002952 rad/s
q	0.0043965 rad/s	0.0042748 rad/s
r	0.00076283 rad/s	0.00085554 rad/s
Waktu simulasi	12.0156 s	12. 0156 s

2. Gerakan belok

Tabel A3.5. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan belok dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.077255 m	0.076433 m
Posisi Y	0.016448 m	0.015702 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.013258 m/s	0.012242 m/s
v	0.0026516 m/s	0.0023643 m/s
w	0.0099399 m/s	0.0092824 m/s
p	0.0034545 rad/s	0.0033701 rad/s
q	0.0047318 rad/s	0.0044662 rad/s
r	0.0008694 rad/s	0.00085928 rad/s
Waktu simulasi	5.3906	5.3906

Tabel A3.6. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan belok dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.073218 m	0.074735 m
Posisi Y	0.0058236 m	0.0060487 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.012344 m/s	0.012436 m/s
v	0.0045968 m/s	0.0048322 m/s
w	0.0048829 m/s	0.0054198 m/s
p	0.0028057 rad/s	0.0030039 rad/s
q	0.0049658 rad/s	0.0046835 rad/s
r	0.0007479 rad/s	0.00081489 rad/s
Waktu simulasi	7.4063 s	7.4063 s

Tabel A3.7. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan belok dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.082101 m	0.078229 m
Posisi Y	0.0053399 m	0.0095326 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.010617 m/s	0.009664 m/s
v	0.0023712 m/s	0.0043426 m/s
w	0.0092089 m/s	0.0078801 m/s
p	0.0027291 rad/s	0.0026638 rad/s
q	0.0045952 rad/s	0.0043799 rad/s
r	0.00058487 rad/s	0.00059727 rad/s
Waktu simulasi	10.0625 s	10.0625 s

Tabel A3.8. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan belok dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.080694 m	0.077977 m
Posisi Y	0.011112 m	0.010532 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.013611 m/s	0.012281 m/s
v	0.0053383 m/s	0.0052523 m/s
w	0.0095793 m/s	0.0084513 m/s
p	0.0028789 rad/s	0.002854 rad/s
q	0.0044448 rad/s	0.0046205 rad/s
r	0.0007919 rad/s	0.00073467 rad/s
Waktu simulasi	11.9844	11.9844

3. Gerakan *diving*

Tabel A3.9. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan *diving* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.061773 m	0.068612 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.02164 m	0.013113 m
u	0.011103 m/s	0.011328 m/s
v	0.0099757 m/s	0.0065411 m/s
w	0.011386 m/s	0.0112794 m/s
p	0.0030646 rad/s	0.003091 rad/s
q	0.0043025 rad/s	0.0042987 rad/s
r	0.001881	0.0013555 rad/s
Waktu simulasi	5.3231 s	5.3125 s

Tabel A3.10. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan *diving* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.074192 m	0.075426 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.00092401 m	0.0025477 m
u	0.010909 m/s	0.0122 m/s
v	0.0058856 m/s	0.0047974 m/s
w	0.0070901 m/s	0.0073046 m/s
p	0.0030353 rad/s	0.003164 rad/s
q	0.004612 rad/s	0.0049249 rad/s
r	0.00081072rad/s	0.00077688 rad/s
Waktu simulasi	7.3243 s	7.3125 s

Tabel A3.11. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan *diving* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.077111 m	0.077228 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.0015987 m	0.003388 m
u	0.0095598 m/s	0.01016 m/s
v	0.007583 m/s	0.0053815 m/s
w	0.0059214 m/s	0.0062817 m/s
p	0.0029775 rad/s	0.0031416 rad/s
q	0.0045034 rad/s	0.0045455 rad/s
r	0.00072153rad/s	0.00081892 rad/s
Waktu simulasi	9.4611 s	9.4531 s

Tabel A3.12. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan *diving* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.078533 m	0.077523 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.0049002 m	0.0044065 m
u	0.012794 m/s	0.012415 m/s
v	0.0032313 m/s	0.0043469 m/s
w	0.0078518 m/s	0.0066218 m/s
p	0.0031092 rad/s	0.0030842 rad/s
q	0.0047531 rad/s	0.0046186 rad/s
r	0.0008784 rad/s	0.00078463 rad/s
Waktu simulasi	11.8594 s	11.8550 s

4. Gerakan belok *diving*

Tabel A3.13. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan belok dan *diving* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.072227 m	0.072724 m
Posisi Y	0.0090404 m	0.010995 m
Posisi Z	0.012347 m	0.0082621 m
u	0.011871 m/s	0.01196 m/s
v	0.0024939 m/s	0.0025524 m/s
w	0.0051066 m/s	0.0049534 m/s
p	0.0036524 rad/s	0.0039573 rad/s
q	0.0046654 rad/s	0.0044153 rad/s
r	0.0007239 rad/s	0.00091893 rad/s
Waktu simulasi	5.3594	5.3474

Tabel A3.14. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan belok dan *diving* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.077216 m	0.076337 m
Posisi Y	0.0015294 m	0.0049686 m
Posisi Z	0.010739 m	0.014739 m
u	0.0083603 m/s	0.0080231 m/s
v	0.0009584 m/s	0.0057815 m/s
w	0.0082609 m/s	0.0088172 m/s
p	0.0032296 rad/s	0.003128 rad/s
q	0.004282 rad/s	0.0042838 rad/s
r	0.00051761rad/s	0.00071846 rad/s
Waktu simulasi	7.2813	7.2813

Tabel A3.15. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan belok dan *diving* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.088299 m	0.086292 m
Posisi Y	0.01098 m	0.010643 m
Posisi Z	0.0039679 m	0.0038699 m
u	0.012743 m/s	0.011763 m/s
v	0.00616 m/s	0.0051707 m/s
w	0.0086723 m/s	0.007222 m/s
p	0.003099 rad/s	0.0029839 rad/s
q	0.0047435 rad/s	0.0045695 rad/s
r	0.00091753rad/s	0.00080554 rad/s
Waktu simulasi	9.6132	9.6094

Tabel A3.16. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan belok dan *diving* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.082077 m	0.07954 m
Posisi Y	0.0013588 m	0.0038704 m
Posisi Z	0.00071287 m	0.0012269 m
u	0.013293 m/s	0.01284 m/s
v	0.0037197 m/s	0.0053377
w	0.0011569 m/s	0.0079102 m/s
p	0.002961 rad/s	0.002784 rad/s
q	0.0037729 rad/s	0.0043958 rad/s
r	0.00057333rad/s	0.00077649 rad/s
Waktu simulasi	12.0114	12

5. Gerakan memutar

Tabel A3.17. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan memutar dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.040295 m	0.040546 m
Posisi Y	0.1188 m	0.11609 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.0042156 m/s	0.048043 m/s
v	0.034025 m/s	0.0085331 m/s
w	0.0025656 m/s	0.022902 m/s
p	0.04379 rad/s	0.043343 rad/s
q	0.0092507 rad/s	0.0060364 rad/s
r	0.019565 rad/s	0.016665 rad/s
Waktu simulasi	5.3594 s	5.3594 s

Tabel A3.18. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan memutar dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.021278 m	0.020874 m
Posisi Y	0.12637 m	0.12701 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.03944 m/s	0.038931 m/s
v	0.0040242 m/s	0.0079211 m/s
w	0.030086 m/s	0.024517 m/s
p	0.041091 rad/s	0.04104 rad/s
q	0.0062846 rad/s	0.0051209 rad/s
r	0.01395 rad/s	0.016099 rad/s
Waktu simulasi	7.3321 s	7.3281 s

Tabel A3.19. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan memutar dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.030961 m	0.028485 m
Posisi Y	0.096866 m	0.10387 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.019529 m/s	0.026468 m/s
v	0.019982 m/s	0.010415 m/s
w	0.039347 m/s	0.022982 m/s
p	0.039746 rad/s	0.04062 rad/s
q	0.0025489 rad/s	0.0033295 rad/s
r	0.017597 rad/s	0.016806 rad/s
Waktu simulasi	9.5397 s	9.5313 s

Tabel A3.20. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan memutar dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.027445 m	0.026774 m
Posisi Y	0.12054 m	0.11614 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.038282 m/s	0.027811 m/s
v	0.0051905 m/s	0.0050426 m/s
w	0.028276 m/s	0.023772 m/s
p	0.048444 rad/s	0.040156 rad/s
q	0.0038976 rad/s	0.0045533 rad/s
r	0.015236 rad/s	0.015231 rad/s
Waktu simulasi	12.3979 s	12.3906 s

6. Gerakan memutar dan *diving*

Tabel A3.21. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan memutar dan *diving* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.0012489 m	0.015077 m
Posisi Y	0.11206 m	0.10938 m
Posisi Z	0.095792 m	0.097396 m
u	0.03153 m/s	0.021847 m/s
v	0.015629 m/s	0.012253 m/s
w	0.01715 m/s	0.033682 m/s
p	0.040994 rad/s	0.040983 rad/s
q	0.0041125 rad/s	0.00077077 rad/s
r	0.018181 rad/s	0.019632 rad/s
Waktu simulasi	5.2868 s	5.2813 s

Tabel A3.22. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan memutar dan *diving* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.064673 m	0.06567 m
Posisi Y	0.13047 m	0.12276 m
Posisi Z	0.10108 m	0.10342 m
u	0.0035162 m/s	0.022184 m/s
v	0.026508 m/s	0.0092623 m/s
w	0.026256 m/s	0.026954 m/s
p	0.039289 rad/s	0.040507 rad/s
q	0.0020449 rad/s	0.0021555 rad/s
r	0.01745 rad/s	0.01681 rad/s
Waktu simulasi	7.2903 s	7.2813 s

Tabel A3.23. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan memutar dan *diving* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.019216 m	0.020004 m
Posisi Y	0.13108 m	0.12005 m
Posisi Z	0.088234 m	0.092981 m
u	0.0094504 m/s	0.024372 m/s
v	0.010827 m/s	0.0075142 m/s
w	0.022799 m/s	0.025341 m/s
p	0.041029 rad/s	0.04175 rad/s
q	0.0028695 rad/s	0.0034412 rad/s
r	0.016837 rad/s	0.016555 rad/s
Waktu simulasi	9.4421 s	9.4375 s

Tabel A3.24. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan memutar dan *diving* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.028999 m	0.029995 m
Posisi Y	0.11048 m	0.11721 m
Posisi Z	0.092151 m	0.095323 m
u	0.014346 m/s	0.024834 m/s
v	0.0035777 m/s	0.0063633 m/s
w	0.022067 m/s	0.023004 m/s
p	0.038197 rad/s	0.03822 rad/s
q	0.0028129 rad/s	0.004141 rad/s
r	0.01275 rad/s	0.014329 rad/s
Waktu simulasi	11.7605 s	11.7500 s

7. Gerakan memutar ellips

Tabel A3.25. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.13915 m	0.1095 m
Posisi Y	0.088603 m	0.06971 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.048296 m/s	0.0012968 m/s
v	0.033015 m/s	0.0093398 m/s
w	0.037959 m/s	0.03382 m/s
p	0.041861 rad/s	0.040302 rad/s
q	0.0016148 rad/s	0.0048035 rad/s
r	0.011288 rad/s	0.011154 rad/s
Waktu simulasi	5.8019 s	5.7969 s

Tabel A3.26. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.091976 m	0.08757 m
Posisi Y	0.037145 m	0.045322 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.024797 m/s	0.024577 m/s
v	0.016096 m/s	0.017627 m/s
w	0.010674 m/s	0.0011902 m/s
p	0.044478 rad/s	0.044408 rad/s
q	0.0044003 rad/s	0.0046916 rad/s
r	0.0090353 rad/s	0.0090872 rad/s
Waktu simulasi	7.5512 s	7.5469 s

Tabel A3.27. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.087656 m	0.085475 m
Posisi Y	0.037451 m	0.045545 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.020948 m/s	0.020462 m/s
v	0.0030223 m/s	0.0032308 m/s
w	0.017993 m/s	0.013579 m/s
p	0.048071 rad/s	0.047182 rad/s
q	0.002565 rad/s	0.0047298 rad/s
r	0.0090159 rad/s	0.009982 rad/s
Waktu simulasi	9.9134 s	9.9063 s

Tabel A3.28. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.089534 m	0.085639 m
Posisi Y	0.047563 m	0.049515 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.024935 m/s	0.02227 m/s
v	0.0028582 m/s	0.0070674 m/s
w	0.0010774 m/s	0.0045938 m/s
p	0.048707 rad/s	0.046404 rad/s
q	0.0063531 rad/s	0.0045531 rad/s
r	0.0097223 rad/s	0.0097214 rad/s
Waktu simulasi	12.3011 s	12.2969 s

8. Gerakan memutar ellips dan *diving*

Tabel A3.29. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.11786 m	0.1088 m
Posisi Y	0.011185 m	0.031942 m
Posisi Z	0.059106 m	0.056432 m
u	0.05294 m/s	0.038462 m/s
v	0.010717 m/s	0.0157474 m/s
w	0.010994 m/s	0.0080455 m/s
p	0.045035 rad/s	0.044675 rad/s
q	0.0065931 rad/s	0.0056822 rad/s
r	0.0082956 rad/s	0.0094424 rad/s
Waktu simulasi	5.3198 s	5.3125 s

Tabel A3.30. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.098797 m	0.098868 m
Posisi Y	0.052029 m	0.05234 m
Posisi Z	0.10366 m	0.09187 m
u	0.012145 m/s	0.014964 m/s
v	0.011182 m/s	0.01423 m/s
w	0.011193 m/s	0.014169 m/s
p	0.046227 rad/s	0.046743 rad/s
q	0.0032314 rad/s	0.0036388 rad/s
r	0.0077665 rad/s	0.0089321 rad/s
Waktu simulasi	5.3643	5.3594

Tabel A3.31. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.10085 m	0.10021 m
Posisi Y	0.066966 m	0.057398 m
Posisi Z	0.061858 m	0.070142 m
u	0.015574 m/s	0.020396 m/s
v	0.0033427 m/s	0.00019311 m/s
w	0.014337 m/s	0.0078589 m/s
p	0.047874 rad/s	0.045348 rad/s
q	0.0023527 rad/s	0.0040647 rad/s
r	0.0094595 rad/s	0.0086487 rad/s
Waktu simulasi	9.6312 s	9.6250 s

Tabel A3.32. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.061894 m	0.072631 m
Posisi Y	0.076813 m	0.065785 m
Posisi Z	0.072952 m	0.076571 m
u	0.018269 m/s	0.020566 m/s
v	0.0020388 m/s	0.001964 m/s
w	0.012442 m/s	0.0046652 m/s
p	0.047246 rad/s	0.045101 rad/s
q	0.0027325 rad/s	0.0031384 rad/s
r	0.0073455 rad/s	0.0044161 rad/s
Waktu simulasi	11.8035 s	11.7969 s

9. Gerakan *diving* dan *emerging*

Tabel A3.33. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.086665 m	0.086853 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.032503 m	0.033027 m
u	0.015837 m/s	0.019271 m/s
v	0.0054008 m/s	0.0036876 m/s
w	0.002783 m/s	0.0060515 m/s
p	0.000411 rad/s	0.00041274 rad/s
q	0.005186 rad/s	0.0052786 rad/s
r	0.0028914 rad/s	0.0026321 rad/s
Waktu simulasi	5.2645 s	5.2500 s

Tabel A3.34. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.096864 m	0.093409 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.029673 m	0.02907 m
u	0.017363 m/s	0.017043 m/s
v	0.0050888 m/s	0.0023214 m/s
w	0.0074992 m/s	0.0068036 m/s
p	0.00099982 rad/s	0.00091826 rad/s
q	0.0049291 rad/s	0.0048509 rad/s
r	0.0028395 rad/s	0.0025909 rad/s
Waktu simulasi	7.3281 s	7.3143 s

Tabel A3.35. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.08129 m	0.082182 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.028506 m	0.028912 m
u	0.019577 m/s	0.019781 m/s
v	0.0038952 m/s	0.0042297 m/s
w	0.0045796 m/s	0.0050125 m/s
p	0.0007266 rad/s	0.00079916 rad/s
q	0.0056279 rad/s	0.0057488 rad/s
r	0.0031758 rad/s	0.0027558 rad/s
Waktu simulasi	9.5114 s	9.5000 s

Tabel A3.36. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.081576 m	0.082281 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.023414 m	0.026513 m
u	0.017651 m/s	0.01872 m/s
v	0.00015368 m/s	0.00023502 m/s
w	0.0063299 m/s	0.0064664 m/s
p	0.00046161 rad/s	0.00047038 rad/s
q	0.0053937 rad/s	0.0053926 rad/s
r	0.0030184 rad/s	0.0026755 rad/s
Waktu simulasi	11.7925 s	11.7813 s

10. Gerakan *diving*, *emerging* dan belok

Tabel A3.37. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF pada gerakan *diving*, *emerging* dan belok dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.11416 m	0.1024 m
Posisi Y	0.021905 m	0.019383 m
Posisi Z	0.03065 m	0.029652 m
u	0.017738 m/s	0.019838 m/s
v	0.005794 m/s	0.0022239 m/s
w	0.013378 m/s	0.0083499 m/s
p	0.0003257 rad/s	0.00058249 rad/s
q	0.0051334 rad/s	0.0051271 rad/s
r	0.0032202 rad/s	0.002946 rad/s
Waktu simulasi	5.2986 s	5.2813 s

Tabel A3.38. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF pada gerakan *diving*, *emerging* dan belok dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.08557 m	0.084588 m
Posisi Y	0.0058302 m	0.010345 m
Posisi Z	0.033882 m	0.031291 m
u	0.016925 m/s	0.015673 m/s
v	0.0023743 m/s	0.003382 m/s
w	0.0097233 m/s	0.0079175 m/s
p	0.00069018rad/s	0.0005296 rad/s
q	0.0053848 rad/s	0.0053539 rad/s
r	0.0022973 rad/s	0.0024731 rad/s
Waktu simulasi	7.3658 s	7.3594 s

Tabel A3.38. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF pada gerakan *diving*, *emerging* dan belok dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.081629 m	0.081888 m
Posisi Y	0.02043 m	0.024326 m
Posisi Z	0.021238 m	0.024618 m
u	0.016344 m/s	0.017714 m/s
v	0.00084405 m/s	0.0024477 m/s
w	0.0088313 m/s	0.0071959 m/s
p	0.0003522 rad/s	0.00054289 rad/s
q	0.0051192 rad/s	0.0051675 rad/s
r	0.002365 rad/s	0.0025435 rad/s
Waktu simulasi	9.7656 s	9.7813 s

Tabel A3.40. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF dan KF pada gerakan *diving*, *emerging* dan belok dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF	KF
Posisi X	0.084796 m	0.083936 m
Posisi Y	0.019127 m	0.018962 m
Posisi Z	0.024307 m	0.027098 m
u	0.018913 m/s	0.019104 m/s
v	0.005284 m/s	0.0047685 m/s
w	0.0052475 m/s	0.0047809 m/s
p	0.00083552rad/s	0.00070354 rad/s
q	0.0051604 rad/s	0.0052332 rad/s
r	0.0030122 rad/s	0.00274 rad/s
Waktu simulasi	12.5237 s	12.5156 s

LAMPIRAN A4 Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF

1. Gerakan lurus

Tabel A4.1. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan lurus dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.08081 m	0.081953 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.0021928 m/s	0.012213 m/s
v	0.00079759 m/s	0.005569 m/s
w	0.0018829 m/s	0.0093798 m/s
p	0.0014752 rad/s	0.0021935 rad/s
q	0.0035701 rad/s	0.0043994 rad/s
r	0.00092072 rad/s	0.00078519 rad/s
Waktu simulasi	5.5754 s	5.5469 s

Tabel A4.2. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan lurus dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.07532 m	0.076666 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.0006472 m/s	0.009343 m/s
v	0.00099908 m/s	0.0051532 m/s
w	0.0011325 m/s	0.0052701 m/s
p	0.0022747 rad/s	0.0029472 rad/s
q	0.004488 rad/s	0.0042373 rad/s
r	0.00008573 rad/s	0.0005749 rad/s
Waktu simulasi	7.5614 s	7.5313 s

Tabel A4.3. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan lurus dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.065861 m	0.070336 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.002067 m/s	0.011713 m/s
v	0.0011836 m/s	0.0036542 m/s
w	0.00067742 m/s	0.0078194 m/s
p	0.0031887 rad/s	0.0032532 rad/s
q	0.0043029 rad/s	0.0046969 rad/s
r	0.0010264 rad/s	0.0017552 rad/s
Waktu simulasi	9.7987 s	9.7613 s

Tabel A4.4. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan lurus dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.080982 m	0.081745 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.00043366 m/s	0.012553 m/s
v	0.001216 m/s	0.0051514 m/s
w	0.0023702 m/s	0.0073845 m/s
p	0.0028334 rad/s	0.002952 rad/s
q	0.0046374 rad/s	0.0042748 rad/s
r	0.00081506 rad/s	0.00085554 rad/s
Waktu simulasi	12.0673 s	12.0156 s

2. Gerakan belok

Tabel A4.5. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan belok dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.075476 m	0.076433 m
Posisi Y	0.013241 m	0.015702 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.00021059 m/s	0.012242 m/s
v	0.00029389 m/s	0.0023643 m/s
w	0.0020835 m/s	0.0092824 m/s
p	0.0030009 rad/s	0.0033701 rad/s
q	0.0049487 rad/s	0.0044662 rad/s
r	0.00075101 rad/s	0.00085928 rad/s
Waktu simulasi	5.4157	5.3906

Tabel A4.6. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan belok dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.072247 m	0.074735 m
Posisi Y	0.0048192 m	0.0060487 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.0008455 m/s	0.012436 m/s
v	0.00060876 m/s	0.0048322 m/s
w	0.00013948 m/s	0.0054198 m/s
p	0.0026316 rad/s	0.0030039 rad/s
q	0.0048583 rad/s	0.0046835 rad/s
r	0.0007022 rad/s	0.00081489 rad/s
Waktu simulasi	7.4317 s	7.4063 s

Tabel A4.7. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan belok dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.078191 m	0.078229 m
Posisi Y	0.0089068 m	0.0095326 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.00093253 m/s	0.009664 m/s
v	0.0033185 m/s	0.0043426 m/s
w	0.002917 m/s	0.0078801 m/s
p	0.0020728 rad/s	0.0026638 rad/s
q	0.0045544 rad/s	0.0043799 rad/s
r	0.00058715 rad/s	0.00059727 rad/s
Waktu simulasi	10.0983 s	10.0625 s

Tabel A4.8. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan belok dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.076993 m	0.077977 m
Posisi Y	0.012333 m	0.010532 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.00078911 m/s	0.012281 m/s
v	0.0061278 m/s	0.0052523 m/s
w	0.00067373 m/s	0.0084513 m/s
p	0.0028475 rad/s	0.002854 rad/s
q	0.0047968 rad/s	0.0046205 rad/s
r	0.0008081 rad/s	0.00073467 rad/s
Waktu simulasi	12.1541	11.9844

3. Gerakan *diving*

Tabel A4.9. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan *diving* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.061024 m	0.068612 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.0002282 m	0.013113 m
u	0.0030175 m/s	0.011328 m/s
v	0.001368 m/s	0.0065411 m/s
w	0.00023605 m/s	0.0114794 m/s
p	0.0028225 rad/s	0.003091 rad/s
q	0.0041425 rad/s	0.0044987 rad/s
r	0.0019841 rad/s	0.0013555 rad/s
Waktu simulasi	5.3347 s	5.3125 s

Tabel A4.10. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan *diving* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.073278 m	0.075426 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.0005181 m	0.0025477 m
u	0.00016814 m/s	0.0122 m/s
v	0.0014091 m/s	0.0047974 m/s
w	0.00037363 m/s	0.0070046 m/s
p	0.0029548 rad/s	0.003064 rad/s
q	0.0046137 rad/s	0.0046249 rad/s
r	0.00039128 rad/s	0.00077688 rad/s
Waktu simulasi	7.3467 s	7.3125 s

Tabel A4.11. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan *diving* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.077115 m	0.077228 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.001201 m	0.003388 m
u	0.00073222 m/s	0.01016 m/s
v	0.0021067 m/s	0.0053815 m/s
w	0.00031637 m/s	0.0062817 m/s
p	0.0027345 rad/s	0.0031416 rad/s
q	0.0044188 rad/s	0.0045455 rad/s
r	0.00063406 rad/s	0.00081892 rad/s
Waktu simulasi	9.4741 s	9.4531 s

Tabel A4.12. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan *diving* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.077435 m	0.077523 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.00021257 m	0.0044065 m
u	0.0012359 m/s	0.012415 m/s
v	0.00027892 m/s	0.0043469 m/s
w	0.00023569 m/s	0.0066218 m/s
p	0.0030018 rad/s	0.0030842 rad/s
q	0.0045886 rad/s	0.0046186 rad/s
r	0.00089016 rad/s	0.00078463 rad/s
Waktu simulasi	11.8655 s	11.8550 s

4. Gerakan belok dan *diving*

Tabel A4.13. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan belok dan *diving* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.072114 m	0.072724 m
Posisi Y	0.012837 m	0.010995 m
Posisi Z	0.00062027 m	0.0082621 m
u	0.00089294 m/s	0.01186 m/s
v	0.0038356 m/s	0.0025524 m/s
w	0.0025255 m/s	0.0069534 m/s
p	0.0035997 rad/s	0.0039573 rad/s
q	0.003888 rad/s	0.0044153 rad/s
r	0.0008412 rad/s	0.00091893 rad/s
Waktu simulasi	5.3654	5.3474

Tabel A4.14. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan belok dan *diving* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.076216 m	0.076337 m
Posisi Y	0.0085938 m	0.0049686 m
Posisi Z	0.0039313 m	0.010739 m
u	0.0041512 m/s	0.0080231 m/s
v	0.00097276 m/s	0.0057815 m/s
w	0.00062322 m/s	0.0088172 m/s
p	0.0030792 rad/s	0.003128 rad/s
q	0.0040748 rad/s	0.0042838 rad/s
r	0.00056956 rad/s	0.00071846 rad/s
Waktu simulasi	7.2912	7.2813

Tabel A4.15. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan belok dan *diving* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.082299 m	0.086292 m
Posisi Y	0.010612 m	0.010643 m
Posisi Z	0.0015547 m	0.0042699 m
u	0.00031244 m/s	0.011763 m/s
v	0.00026765 m/s	0.0051707 m/s
w	0.0018985 m/s	0.007222 m/s
p	0.0029538 rad/s	0.0029839 rad/s
q	0.0044007 rad/s	0.0045695 rad/s
r	0.00064506 rad/s	0.00080554 rad/s
Waktu simulasi	9.6231	9.6094

Tabel A4.16. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan belok dan *diving* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.078077 m	0.07954 m
Posisi Y	0.011138 m	0.0038704 m
Posisi Z	0.0011345 m	0.0012269 m
u	0.0028775 m/s	0.01284 m/s
v	0.0062112 m/s	0.0053377 m/s
w	0.0011319 m/s	0.0079102 m/s
p	0.0025653 rad/s	0.002784 rad/s
q	0.0038333 rad/s	0.0043958 rad/s
r	0.00073158 rad/s	0.00077649 rad/s
Waktu simulasi	12.0456	12

5. Gerakan memutar

Tabel A4.17. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.038927 m	0.040546 m
Posisi Y	0.090251 m	0.11609 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.00038069 m/s	0.028043 m/s
v	0.0054026 m/s	0.0085331 m/s
w	0.0049221 m/s	0.022902 m/s
p	0.042444 rad/s	0.043343 rad/s
q	0.0096826 rad/s	0.0060364 rad/s
r	0.015664 rad/s	0.016665 rad/s
Waktu simulasi	5.3671 s	5.3594 s

Tabel A4.18. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.019923 m	0.020874 m
Posisi Y	0.086038 m	0.12101 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.0011666 m/s	0.038931
v	0.0039263 m/s	0.0079211
w	0.001441 m/s	0.024517
p	0.040675 rad/s	0.04104 rad/s
q	0.0089163 rad/s	0.0051209 rad/s
r	0.013536 rad/s	0.016099 rad/s
Waktu simulasi	7.3438 s	7.3281 s

Tabel A4.19. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.028256 m	0.028485 m
Posisi Y	0.061261 m	0.10387 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.0015657 m/s	0.026468 m/s
v	0.002988 m/s	0.010415 m/s
w	0.00073722 m/s	0.022982 m/s
p	0.039366 rad/s	0.04062 rad/s
q	0.0021008 rad/s	0.0033295 rad/s
r	0.01648 rad/s	0.016806 rad/s
Waktu simulasi	9.5534 s	9.5313 s

Tabel A4.20. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.025314 m	0.026774 m
Posisi Y	0.082272 m	0.11614 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.0014895 m/s	0.027811 m/s
v	0.0013768 m/s	0.0050426 m/s
w	0.004439 m/s	0.023772 m/s
p	0.037556 rad/s	0.040156 rad/s
q	0.0060924 rad/s	0.0045533 rad/s
r	0.014949 rad/s	0.016231 rad/s
Waktu simulasi	12.4178 s	12.3906 s

6. Gerakan memutar dan *diving*

Tabel A4.21. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar dan *diving* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.0012231 m	0.015077 m
Posisi Y	0.065772 m	0.10938 m
Posisi Z	0.00022301 m	0.097396 m
u	0.0073118 m/s	0.021847 m/s
v	0.0047889 m/s	0.012253 m/s
w	0.0069744 m/s	0.033682 m/s
p	0.040319 rad/s	0.040983 rad/s
q	0.00017925 rad/s	0.00077077 rad/s
r	0.018072 rad/s	0.019632 rad/s
Waktu simulasi	5.2976 s	5.2813 s

Tabel A4.22. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar dan *diving* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.064321 m	0.06567 m
Posisi Y	0.07681 m	0.12276 m
Posisi Z	0.0028753 m	0.10342 m
u	0,000021031 m/s	0.022184 m/s
v	0.00084391m/s	0.0092623 m/s
w	0.0027924 m/s	0.026954 m/s
p	0.038079 rad/s	0.040507 rad/s
q	0.0020169 rad/s	0.0021555 rad/s
r	0.012597 rad/s	0.01681 rad/s
Waktu simulasi	7.3069 s	7.2813 s

Tabel A4.23. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar dan *diving* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.019011 m	0.020004 m
Posisi Y	0.099115 m	0.12005 m
Posisi Z	0.0023812 m	0.092981 m
u	0.0033908 m/s	0.024372 m/s
v	0.00085586 m/s	0.0075142 m/s
w	0.0022694 m/s	0.025341 m/s
p	0.040851 rad/s	0.04175 rad/s
q	0.0023867 rad/s	0.0034412 rad/s
r	0.016187 rad/s	0.016555 rad/s
Waktu simulasi	9.4531 s	9.4375 s

Tabel A4.24. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar dan *diving* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.027764 m	0.029995 m
Posisi Y	0.086305 m	0.11721 m
Posisi Z	0.0051107 m	0.095323 m
u	0.00041632 m/s	0.024834 m/s
v	0.0031656 m/s	0.0063633 m/s
w	0.001586 m/s	0.023004 m/s
p	0.037752 rad/s	0.03822 rad/s
q	0.0028047 rad/s	0.004141 rad/s
r	0.012008 rad/s	0.014329 rad/s
Waktu simulasi	11.7756 s	11.7500 s

7. Gerakan memutar ellips

Tabel A4.25. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.11258 m	0.1095 m
Posisi Y	0.12737 m	0.06971 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.0014336 m/s	0.0012968 m/s
v	0.0096696 m/s	0.0093398 m/s
w	0.0027199 m/s	0.03382 m/s
p	0.041528 rad/s	0.040302 rad/s
q	0.0029671 rad/s	0.0048035 rad/s
r	0.011196 rad/s	0.011154 rad/s
Waktu simulasi	5.8147 s	5.7969 s

Tabel A4.26. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.086427 m	0.08757 m
Posisi Y	0.030495 m	0.045322 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.0017787 m/s	0.024577 m/s
v	0.00074019 m/s	0.017627 m/s
w	0.0021252 m/s	0.0011902 m/s
p	0.042645 rad/s	0.046408 rad/s
q	0.0058062 rad/s	0.0046916 rad/s
r	0.0088272 rad/s	0.0090872 rad/s
Waktu simulasi	7.5657 s	7.5469 s

Tabel A4.27. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.084656 m	0.085475 m
Posisi Y	0.082726 m	0.045545 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.0047687 m/s	0.023462 m/s
v	0.0038582 m/s	0.0032308 m/s
w	0.00028394 m/s	0.013579 m/s
p	0.04768 rad/s	0.047182 rad/s
q	0.001367 rad/s	0.0047298 rad/s
r	0.0099498 rad/s	0.009932 rad/s
Waktu simulasi	9.9219 s	9.9063 s

Tabel A4.28. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.086345 m	0.085639 m
Posisi Y	0.044592 m	0.049515 m
Posisi Z	0 m	0 m
u	0.0042989 m/s	0.02227 m/s
v	0.002954 m/s	0.0070674 m/s
w	0.00047696 m/s	0.0045938 m/s
p	0.047989 rad/s	0.046404 rad/s
q	0.007839 rad/s	0.0045531 rad/s
r	0.0097475 rad/s	0.0097814 rad/s
Waktu simulasi	12.3125 s	12.2969 s

8. Gerakan memutar ellips *diving*

Tabel A4.29. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF, EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.09982 m	0.1088 m
Posisi Y	0.10662 m	0.031942 m
Posisi Z	0.0014701 m	0.056432 m
u	0.011583 m/s	0.038462 m/s
v	0.012993 m/s	0.0117474 m/s
w	0.0013179 m/s	0.0080455 m/s
p	0.043942 rad/s	0.044675 rad/s
q	0.0053329 rad/s	0.0056822 rad/s
r	0.0096993 rad/s	0.0094424 rad/s
Waktu simulasi	5.3286 s	5.3125 s

Tabel A4.30. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.095642 m	0.098868 m
Posisi Y	0.051691 m	0.05234 m
Posisi Z	0.0026281 m	0.09187 m
u	0.0010079 m/s	0.014964 m/s
v	0.0027767 m/s	0.01423 m/s
w	0.0029869 m/s	0.014169 m/s
p	0.045292 rad/s	0.046743 rad/s
q	0.0030821 rad/s	0.0036388 rad/s
r	0.0065695 rad/s	0.0089321 rad/s
Waktu simulasi	5.3704	5.3594

Tabel A4.31. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.09085 m	0.10021 m
Posisi Y	0.088279 m	0.057398 m
Posisi Z	0.0003838 m	0.070142 m
u	0.00095652 m/s	0.020396 m/s
v	0.002807 m/s	0.00019311 m/s
w	0.0025077 m/s	0.0078589 m/s
p	0.044902 rad/s	0.045348 rad/s
q	0.0016995 rad/s	0.0040647 rad/s
r	0.011352 rad/s	0.0086487 rad/s
Waktu simulasi	9.6406 s	9.6250 s

Tabel A4.32. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan memutar ellips dan *diving* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.061765 m	0.072631 m
Posisi Y	0.10029 m	0.065785 m
Posisi Z	0.001977 m	0.076571 m
u	0.0032417 m/s	0.020566 m/s
v	0.0059725 m/s	0.001964 m/s
w	0.0042058 m/s	0.0046652 m/s
p	0.045062 rad/s	0.045101 rad/s
q	0.002047 rad/s	0.0031384 rad/s
r	0.0085426 rad/s	0.0044161 rad/s
Waktu simulasi	11.8114 s	11.7969 s

9. Gerakan *diving emerging*

Tabel A4.33. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging* dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.085754 m	0.086853 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.00080876 m	0.033027 m
u	0.00018716 m/s	0.019271 m/s
v	0.00017894 m/s	0.0036876 m/s
w	0.00025892 m/s	0.0060515 m/s
p	0.0004123 rad/s	0.00041274 rad/s
q	0.0051557 rad/s	0.0052786 rad/s
r	0.0031475 rad/s	0.0026321 rad/s
Waktu simulasi	5.342 s	5.2500 s

Tabel A4.34. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging* dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.09025 m	0.093409 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.0029538 m	0.03007 m
u	0.00022272 m/s	0.017043 m/s
v	0.00084333 m/s	0.0023214 m/s
w	0.00080289 m/s	0.0068036 m/s
p	0.00090556 rad/s	0.00091826 rad/s
q	0.0045978 rad/s	0.0048509 rad/s
r	0.0029408 rad/s	0.0025909 rad/s
Waktu simulasi	7.3541 s	7.3143 s

Tabel A4.35. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging* dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.08113 m	0.082182 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.0012287 m	0.028912 m
u	0.0011039 m/s	0.019781 m/s
v	0.00076356 m/s	0.0042297 m/s
w	0.0010807 m/s	0.0050125 m/s
p	0.0007197 rad/s	0.00079916 rad/s
q	0.0053294 rad/s	0.0057488 rad/s
r	0.0032326 rad/s	0.0027558 rad/s
Waktu simulasi	9.5178 s	9.5000 s

Tabel A4.36. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF berdasarkan gerakan *diving* dan *emerging* dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.08024 m	0.082281 m
Posisi Y	0 m	0 m
Posisi Z	0.00095117 m	0.026513 m
u	0.00062986 m/s	0.01872 m/s
v	0.0017059 m/s	0.00023502 m/s
w	0.000027984 m/s	0.0064664 m/s
p	0.00045067 rad/s	0.00047038 rad/s
q	0.0052026 rad/s	0.0053926 rad/s
r	0.0032469 rad/s	0.0026755 rad/s
Waktu simulasi	11.8021 s	11.7813 s

10. Gerakan *diving emerging* dan belok

Tabel A4.37. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF pada gerakan memutar *diving, emerging* dan belok dengan membangkitkan 100 ensemble

	100 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.0985 m	0.1024 m
Posisi Y	0.017939 m	0.019383 m
Posisi Z	0.0021883 m	0.029652 m
u	0.0011475 m/s	0.019838 m/s
v	0.0006709 m/s	0.0022239 m/s
w	0.00011926 m/s	0.0083499 m/s
p	0.00016015 rad/s	0.00058249 rad/s
q	0.005017 rad/s	0.0051271 rad/s
r	0.0028384 rad/s	0.002946 rad/s
Waktu simulasi	5.3125 s	5.2813 s

Tabel A4.38. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF pada gerakan memutar *diving, emerging* dan belok dengan membangkitkan 200 ensemble

	200 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.08354 m	0.084588 m
Posisi Y	0.012912 m	0.013345 m
Posisi Z	0.00093288 m	0.031291 m
u	0.0014906 m/s	0.015673 m/s
v	0.00285475 m/s	0.003382 m/s
w	0.002032 m/s	0.0079175 m/s
p	0.00046831 rad/s	0.0005296 rad/s
q	0.0051148 rad/s	0.0056539 rad/s
r	0.0023121 rad/s	0.0024731 rad/s
Waktu simulasi	7.3781 s	7.3594 s

Tabel A4.39. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF pada gerakan *diving, emerging* dan belok dengan membangkitkan 300 ensemble

	300 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.081543 m	0.081888 m
Posisi Y	0.015477 m	0.024326 m
Posisi Z	0.00027214 m	0.024618 m
u	0.00041528 m/s	0.017714 m/s
v	0.00032958 m/s	0.0024477 m/s
w	0.0018121 m/s	0.0071959 m/s
p	0.0001419 rad/s	0.00054289 rad/s
q	0.0050567 rad/s	0.0051675 rad/s
r	0.0019399 rad/s	0.0025435 rad/s
Waktu simulasi	9.7987 s	9.7813 s

Tabel A4.40. Perbandingan nilai RMSE antara EnKF-SR dan KF pada gerakan memutar *diving*, *emerging* dan belok dengan membangkitkan 400 ensemble

	400 ensemble	
	EnKF-SR	KF
Posisi X	0.082796 m	0.083936 m
Posisi Y	0.016755 m	0.018962 m
Posisi Z	0.00092496 m	0.027098 m
u	0.000066838 m/s	0.019104 m/s
v	0.0013083 m/s	0.0047685 m/s
w	0.0001266 m/s	0.0047809 m/s
p	0.0005804 rad/s	0.00070354 rad/s
q	0.0047075 rad/s	0.0052332 rad/s
r	0.0026959 rad/s	0.00274 rad/s
Waktu simulasi	12.5313 s	12.5156 s

LAMPIRAN A5 Perbandingan nilai RMSE dengan Metode EnKF pada Sepuluh Lintasan

Tabel A5.1. Perbandingan Nilai RMSE dengan metode EnKF pada Sepuluh Lintasan dengan membangkitkan 100 ensemble

	Lintasan 1 EnKF	Lintasan 2 EnKF	Lintasan 3 EnKF	Lintasan 4 EnKF	Lintasan 5 EnKF	Lintasan 6 EnKF	Lintasan 7 EnKF	Lintasan 8 EnKF	Lintasan 9 EnKF	Lintasan 10 EnKF
x	0.087412 m	0.077255 m	0.061773 m	0.072227 m	0.040295 m	0.0012489 m	0.13915 m	0.11786 m	0.088665 m	0.11416 m
y	0 m	0.016448 m	0 m	0.0090404 m	0.1188 m	0.11206 m	0.088603 m	0.011185 m	0 m	0.021905 m
z	0 m	0 m	0.02164 m	0.012347 m	0 m	0.095792 m	0 m	0.059106 m	0.032503 m	0.03065 m
u	0.014727 m/s	0.013258 m/s	0.011103 m/s	0.011971 m/s	0.0042156 m/s	0.03153 m/s	0.048296 m/s	0.05294 m/s	0.015837 m/s	0.017738 m/s
v	0.0058372 m/s	0.0026516 m/s	0.0099757 m/s	0.0024939 m/s	0.034025 m/s	0.015629 m/s	0.033015 m/s	0.010717 m/s	0.0054008 m/s	0.005794 m/s
w	0.010385 m/s	0.0099399 m/s	0.011386 m/s	0.0041066 m/s	0.0025656 m/s	0.01715 m/s	0.037959 m/s	0.010994 m/s	0.002783 m/s	0.013378 m/s
p	0.0022822 rad/s	0.0034545 rad/s	0.0031646	0.0036524 rad/s	0.04379 rad/s	0.040994 rad/s	0.041861 rad/s	0.045035	0.00075109rad/s	0.0003257 rad/s
			rad/s					rad/s		
q	0.0041521 rad/s	0.0047318 rad/s	0.0043025	0.0046654 rad/s	0.0092507	0.0041125 rad/s	0.0016148	0.0065931	0.005186 rad/s	0.0051334 rad/s
			rad/s		rad/s		rad/s	rad/s		
r	0.00071592rad/s	0.0007694 rad/s	0.001881 rad/s	0.0007239 rad/s	0.019565 rad/s	0.018181 rad/s	0.011288 rad/s	0.0082956	0.0028914 rad/s	0.0032202 rad/s
								rad/s		
waktu	5.5579 s	5.3906	5.3231 s	5.3594	5.3594 s	5.2868 s	5.8019 s	5.3198 s	5.2645 s	5.2986 s

Tabel A5.2. Perbandingan Nilai RMSE dengan metode EnKF pada Sepuluh Lintasan dengan membangkitkan 200 ensemble

	Lintasan 1 EnKF	Lintasan 2 EnKF	Lintasan 3 EnKF	Lintasan 4 EnKF	Lintasan 5 EnKF	Lintasan 6 EnKF	Lintasan 7 EnKF	Lintasan 8 EnKF	Lintasan 9 EnKF	Lintasan 10 EnKF
x	0.077434 m	0.073218 m	0.074192 m	0.077216 m	0.021278 m	0.064673 m	0.091976 m	0.098797 m	0.096864 m	0.08557 m
y	0 m	0.0058236 m	0 m	0.0015294 m	0.12637 m	0.13047 m	0.037145 m	0.052029 m	0 m	0.0058302 m
z	0 m	0 m	0.00092401 m	0.014739 m	0 m	0.10108 m	0 m	0.10366 m	0.029673 m	0.033882 m
u	0.0094538 m/s	0.012344 m/s	0.010909 m/s	0.0083603 m/s	0.03944 m/s	0.0035162 m/s	0.024797 m/s	0.012145 m/s	0.017363 m/s	0.016925 m/s
v	0.0022562 m/s	0.0045968 m/s	0.0058856 m/s	0.0009584 m/s	0.0040242 m/s	0.026508 m/s	0.016096 m/s	0.011182 m/s	0.0050888 m/s	0.0023743 m/s
w	0.0046892 m/s	0.0048829 m/s	0.0073901 m/s	0.0082609 m/s	0.030086 m/s	0.026256 m/s	0.010674 m/s	0.011193 m/s	0.0074992 m/s	0.0097233 m/s
p	0.0030518 rad/s	0.0028057 rad/s	0.0031353 rad/s	0.0032296 rad/s	0.041091 rad/s	0.039289 rad/s	0.044478 rad/s	0.046227 rad/s	0.00099982rad/ s	0.00069018rad/s
q	0.0046431 rad/s	0.0049658 rad/s	0.004912 rad/s	0.004282 rad/s	0.0062846 rad/s	0.0020449 rad/s	0.0044003 rad/s	0.0032314 rad/s	0.0049291 rad/s	0.0053848 rad/s
r	0.00026163rad/ s	0.0007479 rad/s	0.00081072rad/ s	0.000517 rad/s	0.01395 rad/s	0.01445 rad/s	0.0099353 rad/s	0.0077665 rad/s	0.0028395 rad/s	0.0022973 rad/s
waktu	7.5452 s	7.4063 s	7.3243 s	7.2813	7.3321 s	7.2903 s	7.5512 s	7.3643	7.3281 s	7.3658 s

Tabel A5.3. Perbandingan Nilai RMSE dengan metode EnKF pada Sepuluh Lintasan dengan membangkitkan 300 ensemble

	Lintasan 1 EnKF	Lintasan 2 EnKF	Lintasan 3 EnKF	Lintasan 4 EnKF	Lintasan 5 EnKF	Lintasan 6 EnKF	Lintasan 7 EnKF	Lintasan 8 EnKF	Lintasan 9 EnKF	Lintasan 10 EnKF
x	0.066126 m	0.082101 m	0.077111 m	0.088299 m	0.030961 m	0.019216 m	0.087656 m	0.10085 m	0.08129 m	0.081629 m
y	0 m	0.0053399 m	0 m	0.01098 m	0.096866 m	0.13108 m	0.037451 m	0.066966 m	0 m	0.02043 m
z	0 m	0 m	0.0015987 m	0.0039679 m	0 m	0.088234 m	0 m	0.061858 m	0.028506 m	0.021238 m
u	0.011394 m/s	0.010617 m/s	0.0095598 m/s	0.012743 m/s	0.019529 m/s	0.0094504 m/s	0.020948 m/s	0.015574 m/s	0.019577 m/s	0.016344 m/s
v	0.003339 m/s	0.0023712 m/s	0.007583 m/s	0.00616 m/s	0.019982 m/s	0.010827 m/s	0.0030223 m/s	0.0033427 m/s	0.0038952 m/s	0.00084405 m/s
w	0.0075713 m/s	0.0092089 m/s	0.0059214 m/s	0.0086723 m/s	0.039347 m/s	0.022799 m/s	0.017993 m/s	0.014337 m/s	0.0045796 m/s	0.0088313 m/s
p	0.003224 rad/s	0.0027291 rad/s	0.0029775 rad/s	0.003099 rad/s	0.039746 rad/s	0.041029 rad/s	0.048071 rad/s	0.047874 rad/s	0.0007266 rad/s	0.00035229rad/s
q	0.004631 rad/s	0.0045952 rad/s	0.0045034 rad/s	0.0047435 rad/s	0.0025489 rad/s	0.0028695 rad/s	0.002565 rad/s	0.0023527 rad/s	0.0056279 rad/s	0.0051192 rad/s
r	0.001224 rad/s	0.00058487rad/s	0.00072153rad/s	0.00091753rad/s	0.017597 rad/s	0.016837 rad/s	0.0090159 rad/s	0.0094595 rad/s	0.0031758 rad/s	0.002365 rad/s
waktu	9.7856 s	10.0625 s	9.4611 s	9.6132	9.5397 s	9.4421 s	9.9134 s	9.6312 s	9.5114 s	9.7656 s

Tabel A5.4. Perbandingan Nilai RMSE dengan metode EnKF pada Sepuluh Lintasan dengan membangkitkan 400 ensemble

	Lintasan 1 EnKF	Lintasan 2 EnKF	Lintasan 3 EnKF	Lintasan 4 EnKF	Lintasan 5 EnKF	Lintasan 6 EnKF	Lintasan 7 EnKF	Lintasan 8 EnKF	Lintasan 9 EnKF	Lintasan 10 EnKF
x	0.087291 m	0.080694 m	0.078533 m	0.082077 m	0.027445 m	0.028999 m	0.089534 m	0.061894 m	0.081576 m	0.084796 m
y	0 m	0.011112 m	0 m	0.0013588 m	0.12054 m	0.12048 m	0.047563 m	0.076813 m	0 m	0.019127 m
z	0 m	0 m	0.0049002 m	0.00071287 m	0 m	0.092151 m	0 m	0.072952 m	0.023414 m	0.024307 m
u	0.013621 m/s	0.013611 m/s	0.012794 m/s	0.013293 m/s	0.038282 m/s	0.014346 m/s	0.024935 m/s	0.018269 m/s	0.017651 m/s	0.018913 m/s
v	0.0069869 m/s	0.0053383 m/s	0.0032313 m/s	0.0037197 m/s	0.0021905 m/s	0.0035777 m/s	0.0028582 m/s	0.0020388 m/s	0.00015368 m/s	0.005284 m/s
w	0.006374 m/s	0.0095793 m/s	0.0078518 m/s	0.0011569 m/s	0.028276 m/s	0.024067 m/s	0.0010774 m/s	0.012442 m/s	0.0073299 m/s	0.0052475 m/s
p	0.0030691 rad/s	0.0028789 rad/s	0.0031092 rad/s	0.002961 rad/s	0.038444 rad/s	0.038197 rad/s	0.048707 rad/s	0.047246 rad/s	0.00046161rad/s	0.00083552rad/s
q	0.0043965 rad/s	0.0044448 rad/s	0.0047531 rad/s	0.0037729 rad/s	0.0038976 rad/s	0.0028129 rad/s	0.0063531 rad/s	0.0027325 rad/s	0.0054937 rad/s	0.0051604 rad/s
r	0.00076283rad/s	0.0007919 rad/s	0.0008784 rad/s	0.00057333rad/s	0.015236 rad/s	0.01275 rad/s	0.0097223 rad/s	0.0073455 rad/s	0.0030184 rad/s	0.0030122 rad/s
waktu	12.0156 s	11.9844	11.8594 s	12.0114	12.3979 s	11.7605 s	12.3011 s	11.8035 s	11.7925 s	12.5237 s

LAMPIRAN A6 Perbandingan nilai RMSE dengan EnKF-SR pada Sepuluh Lintasan

Tabel A6.1. Perbandingan Nilai RMSE dengan metode EnKF-SR pada Sepuluh Lintasan dengan membangkitkan 100 ensemble

	Lintasan 1 EnKF-SR	Lintasan 2 EnKF-SR	Lintasan 3 EnKF-SR	Lintasan 4 EnKF-SR	Lintasan 5 EnKF-SR	Lintasan 6 EnKF-SR	Lintasan 7 EnKF-SR	Lintasan 8 EnKF-SR	Lintasan 9 EnKF-SR	Lintasan 10 EnKF-SR
x	0.08081 m	0.075476 m	0.061024 m	0.072114 m	0.038927 m	0.0012231 m	0.11258 m	0.09982 m	0.085754 m	0.0985 m
y	0 m	0.013241 m	0 m	0.012837 m	0.090251 m	0.065772 m	0.12737 m	0.10662 m	0 m	0.017939 m
z	0 m	0 m	0.0002282 m	0.00062027 m	0 m	0.00022301 m	0 m	0.0014701 m	0.00080876 m	0.0021883 m
u	0.0021928 m/s	0.00021059 m/s	0.0030175 m/s	0.00089294 m/s	0.00038069 m/s	0.0073118 m/s	0.0014336 m/s	0.011583 m/s	0.00018716 m/s	0.0011475 m/s
v	0.00079759 m/s	0.00029389 m/s	0.001368 m/s	0.0038356 m/s	0.0054026 m/s	0.0047889 m/s	0.0096696 m/s	0.012993 m/s	0.00017894 m/s	0.0006709 m/s
w	0.0018829 m/s	0.0020835 m/s	0.00023605 m/s	0.0025255 m/s	0.0049221 m/s	0.0069744 m/s	0.0027199 m/s	0.0013179 m/s	0.00025892 m/s	0.00011926 m/s
p	0.0014752 rad/s	0.0030009 rad/s	0.0028225 rad/s	0.0035997 rad/s	0.042444 rad/s	0.040319 rad/s	0.041528 rad/s	0.043942 rad/s	0.0004123 rad/s	0.00016015 rad/s
q	0.0035701 rad/s	0.0049487 rad/s	0.0041425 rad/s	0.003888 rad/s	0.0096826 rad/s	0.00017925 rad/s	0.0029671 rad/s	0.0053329 rad/s	0.0051557 rad/s	0.005017 rad/s
r	0.00092072 rad/s	0.00075101 rad/s	0.0019841 rad/s	0.0008412 rad/s	0.015664 rad/s	0.018072 rad/s	0.011196 rad/s	0.0096993 rad/s	0.0031475 rad/s	0.0028384 rad/s
waktu	5.5754 s	5.4157	5.3347 s	5.3654	5.3671 s	5.2976 s	5.8147 s	5.3286 s	5.342 s	5.3125 s

Tabel A6.2. Perbandingan Nilai RMSE dengan metode EnKF-SR pada Sepuluh Lintasan dengan membangkitkan 200 ensemble

	Lintasan 1 EnKF-SR	Lintasan 2 EnKF-SR	Lintasan 3 EnKF-SR	Lintasan 4 EnKF-SR	Lintasan 5 EnKF-SR	Lintasan 6 EnKF-SR	Lintasan 7 EnKF-SR	Lintasan 8 EnKF-SR	Lintasan 9 EnKF-SR	Lintasan 10 EnKF-SR
x	0.07532 m	0.072247 m	0.073278 m	0.076216 m	0.019923 m	0.064321 m	0.086427 m	0.095642 m	0.09025 m	0.08354 m
y	0 m	0.0048192 m	0 m	0.0085938 m	0.086038 m	0.07681 m	0.030495 m	0.051691 m	0 m	0.012912 m
z	0 m	0 m	0.0005181 m	0.0039313 m	0 m	0.0028753 m	0 m	0.0026281 m	0.0029538 m	0.00093288 m
u	0.0006472 m/s	0.0008455 m/s	0.00016814 m/s	0.0041512 m/s	0.0011666 m/s	0,000021031 m/s	0.0017787 m/s	0.0010079 m/s	0.00022272 m/s	0.0014906 m/s
v	0.00099908 m/s	0.00060876 m/s	0.0014091 m/s	0.00097276 m/s	0.0039263 m/s	0.000843m/s	0.00074019 m/s	0.0027767 m/s	0.00084333 m/s	0.00285475 m/s
w	0.0011325 m/s	0.00013948 m/s	0.00037363 m/s	0.00062322 m/s	0.001441 m/s	0.0027924 m/s	0.0021252 m/s	0.0029869 m/s	0.00080289 m/s	0.002032 m/s
p	0.0022747 rad/s	0.0026316 rad/s	0.0029548 rad/s	0.0030792 rad/s	0.040675 rad/s	0.038079 rad/s	0.042645 rad/s	0.045292 rad/s	0.00090556 rad/s	0.00046831 rad/s
q	0.004488 rad/s	0.0048583 rad/s	0.0046137 rad/s	0.0040748 rad/s	0.0089163 rad/s	0.0020169 rad/s	0.0058062 rad/s	0.0030821 rad/s	0.0045978 rad/s	0.0051148 rad/s
r	0.00008573 rad/s	0.0007022 rad/s	0.00039128 rad/s	0.00056956 rad/s	0.013536 rad/s	0.012597 rad/s	0.0088272 rad/s	0.0065695 rad/s	0.0029408 rad/s	0.0023121 rad/s
waktu	7.5614 s	7.4317 s	7.3467 s	7.2912 s	7.3438 s	7.3069 s	7.5657 s	7.3704 s	7.3541 s	7.3781 s

Tabel A6.3. Perbandingan Nilai RMSE dengan metode EnKF-SR pada Sepuluh Lintasan dengan membangkitkan 300 ensemble

	Lintasan 1 EnKF-SR	Lintasan 2 EnKF-SR	Lintasan 3 EnKF-SR	Lintasan 4 EnKF-SR	Lintasan 5 EnKF-SR	Lintasan 6 EnKF-SR	Lintasan 7 EnKF-SR	Lintasan 8 EnKF-SR	Lintasan 9 EnKF-SR	Lintasan 10 EnKF-SR
x	0.065861 m	0.078191 m	0.077115 m	0.082299 m	0.028256 m	0.019011 m	0.084656 m	0.09085 m	0.08113 m	0.081543 m
y	0 m	0.0089068 m	0 m	0.010612 m	0.061261 m	0.099115 m	0.082726 m	0.088279 m	0 m	0.015477 m
z	0 m	0 m	0.001201 m	0.0015547 m	0 m	0.0023812 m	0 m	0.0003838 m	0.0012287 m	0.00027214 m
u	0.002067 m/s	0.00093253 m/s	0.00073222 m/s	0.00031244 m/s	0.0015657 m/s	0.0033908 m/s	0.0047687 m/s	0.00095652 m/s	0.0011039 m/s	0.00041528 m/s
v	0.0011836 m/s	0.0033185 m/s	0.0021067 m/s	0.00026765 m/s	0.002988 m/s	0.00085586 m/s	0.0038582 m/s	0.002807 m/s	0.00076356 m/s	0.00032958 m/s
w	0.00067742 m/s	0.002917 m/s	0.00031637 m/s	0.0018985 m/s	0.00073722 m/s	0.0022694 m/s	0.00028394 m/s	0.0025077 m/s	0.0010807 m/s	0.0018121 m/s
p	0.0031887 rad/s	0.0020728 rad/s	0.0027345 rad/s	0.0029538 rad/s	0.039366 rad/s	0.040851 rad/s	0.04768 rad/s	0.044902 rad/s	0.0007197 rad/s	0.0001419 rad/s
q	0.0043029 rad/s	0.0045544 rad/s	0.0044188 rad/s	0.0044007 rad/s	0.0021008 rad/s	0.0023867 rad/s	0.001367 rad/s	0.0016995 rad/s	0.0053294 rad/s	0.0050567 rad/s
r	0.0010264 rad/s	0.00058715 rad/s	0.00063406 rad/s	0.00064506 rad/s	0.01648 rad/s	0.016187 rad/s	0.0099498 rad/s	0.011352 rad/s	0.0032326 rad/s	0.0019399 rad/s
waktu	9.7987 s	10.0983 s	9.4741 s	9.6231	9.5534 s	9.4531 s	9.9219 s	9.6406 s	9.5178 s	9.7987 s

Tabel A6.4. Perbandingan Nilai RMSE dengan metode EnKF-SR pada Sepuluh Lintasan dengan membangkitkan 400 ensemble

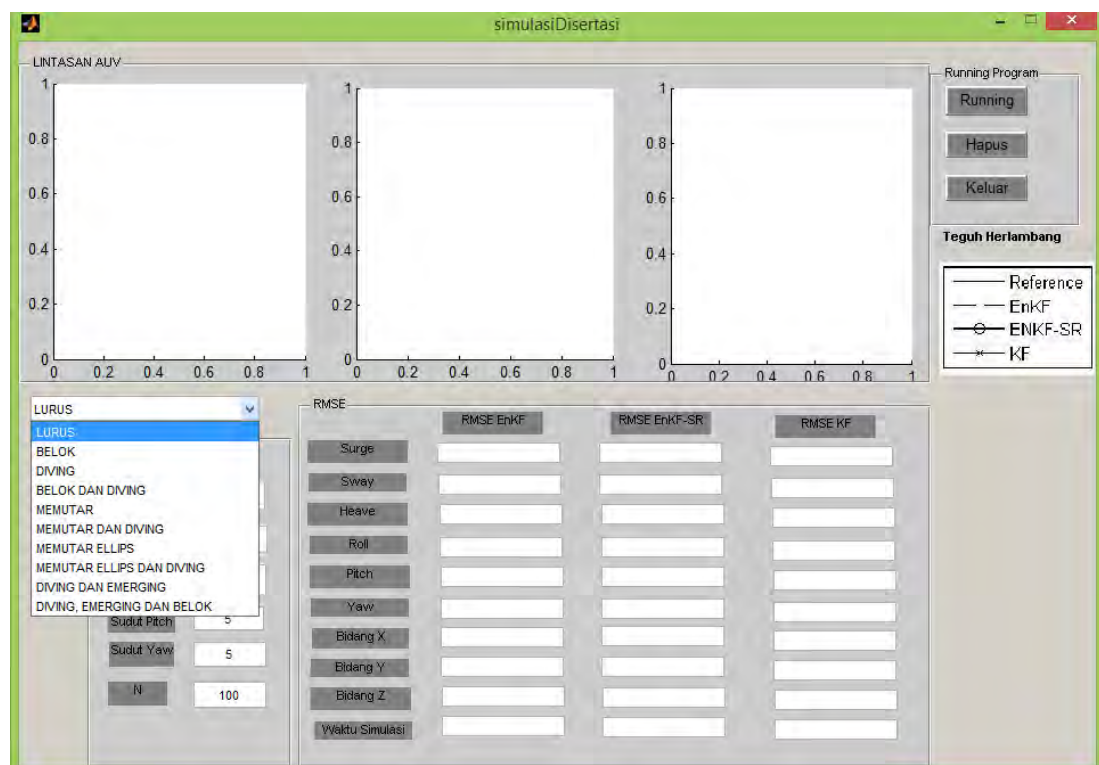
	Lintasan 1 EnKF-SR	Lintasan 2 EnKF-SR	Lintasan 3 EnKF-SR	Lintasan 4 EnKF-SR	Lintasan 5 EnKF-SR	Lintasan 6 EnKF-SR	Lintasan 7 EnKF-SR	Lintasan 8 EnKF-SR	Lintasan 9 EnKF-SR	Lintasan 10 EnKF-SR
x	0.080982 m	0.076993 m	0.077435 m	0.078077 m	0.025314 m	0.027764 m	0.086345 m	0.061765 m	0.08024 m	0.082796 m
y	0 m	0.012333 m	0 m	0.011138 m	0.082272 m	0.086305 m	0.084592 m	0.10029 m	0 m	0.016755 m
z	0 m	0 m	0.00021257 m	0.0011345 m	0 m	0.0051107 m	0 m	0.001977 m	0.00095117 m	0.00092496 m
u	0.00043366 m/s	0.00078911 m/s	0.0012359 m/s	0.0028775 m/s	0.0014895 m/s	0.00041632 m/s	0.0042989 m/s	0.0032417 m/s	0.00062986 m/s	0.000066838 m/s
v	0.001216 m/s	0.0061278 m/s	0.00027892 m/s	0.0062112 m/s	0.0013768 m/s	0.0031656 m/s	0.002954 m/s	0.0059725 m/s	0.0017059 m/s	0.0013083 m/s
w	0.0023702 m/s	0.00067373 m/s	0.00023569 m/s	0.0011319 m/s	0.004439 m/s	0.001586 m/s	0.00047696 m/s	0.0042058 m/s	0.000027984 m/s	0.0001266 m/s
p	0.0028334 rad/s	0.0028475 rad/s	0.0030018 rad/s	0.0025653 rad/s	0.037556 rad/s	0.037752 rad/s	0.047989 rad/s	0.045062 rad/s	0.00045067 rad/s	0.0005804 rad/s
q	0.0046374 rad/s	0.0047968 rad/s	0.0045886 rad/s	0.0038333 rad/s	0.0060924 rad/s	0.0028047 rad/s	0.007839 rad/s	0.002047 rad/s	0.0052026 rad/s	0.0047075 rad/s
r	0.00081506 rad/s	0.0008081 rad/s	0.00089016 rad/s	0.00073158 rad/s	0.014949 rad/s	0.012008 rad/s	0.0097475 rad/s	0.0085426 rad/s	0.0032469 rad/s	0.0026959 rad/s
waktu	12.0673 s	12.1541 s	11.8655 s	12.0456 s	12.4178 s	11.7756 s	12.3125 s	11.8114 s	11.8021 s	12.5313 s

LAMPIRAN B

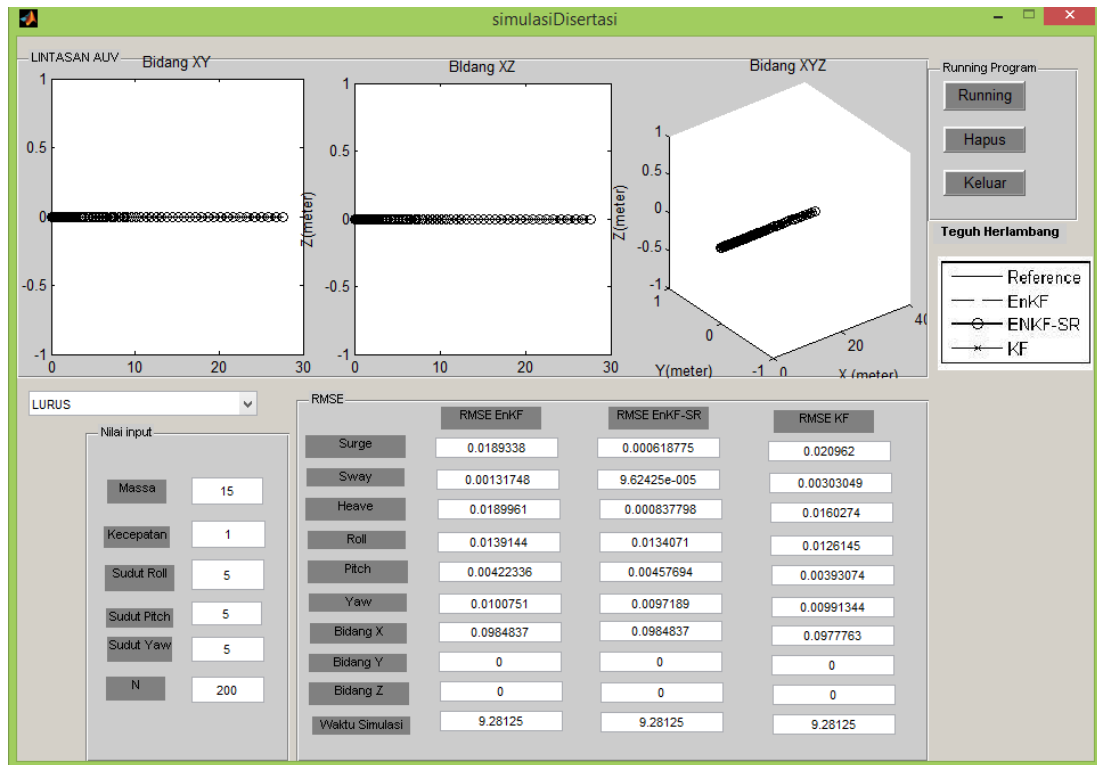
GUI Interface dari Sistem Navigasi dan Panduan



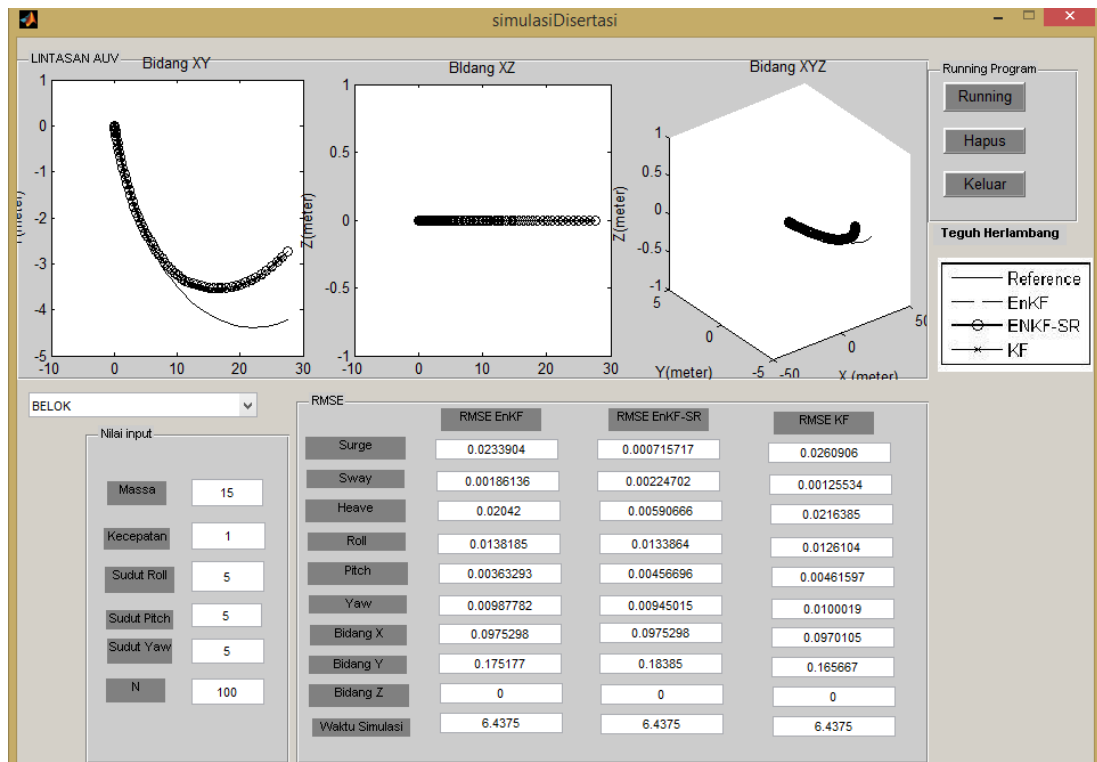
Gambar B1. GUI utama dari Disertasi



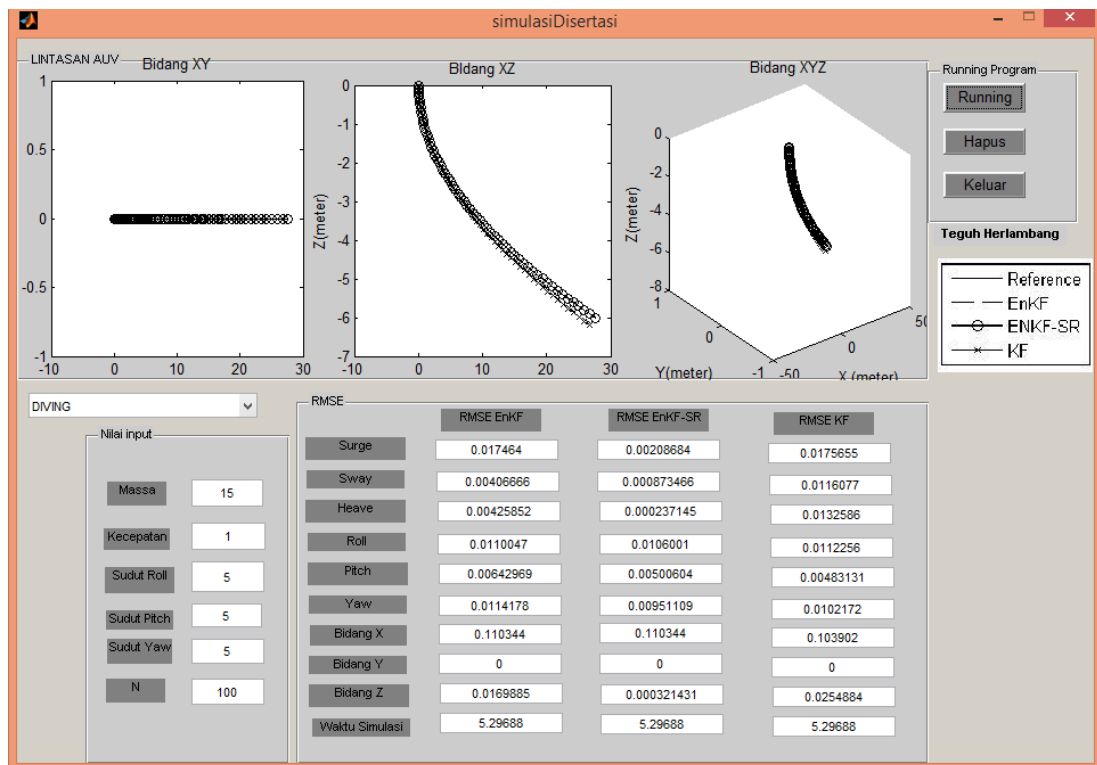
Gambar B2. GUI dari Sistem Navigasi dan Panduan



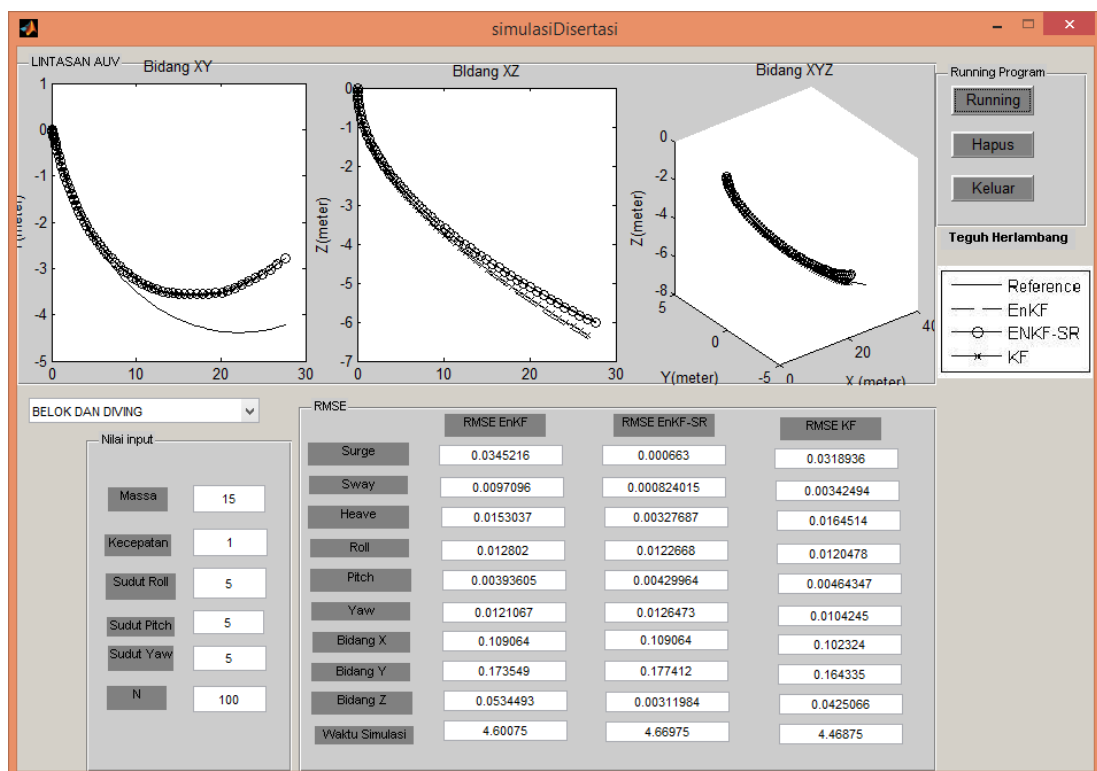
Gambar B3. GUI dari Lintasan Pertama



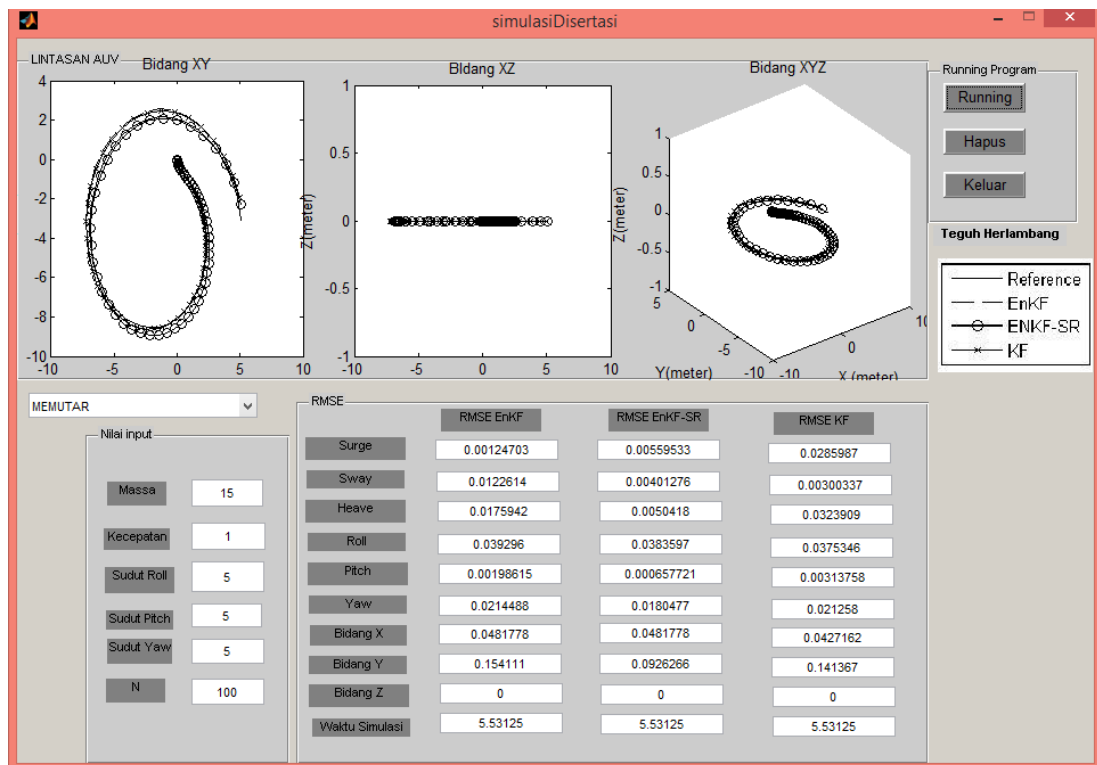
Gambar B4. GUI dari Lintasan Kedua



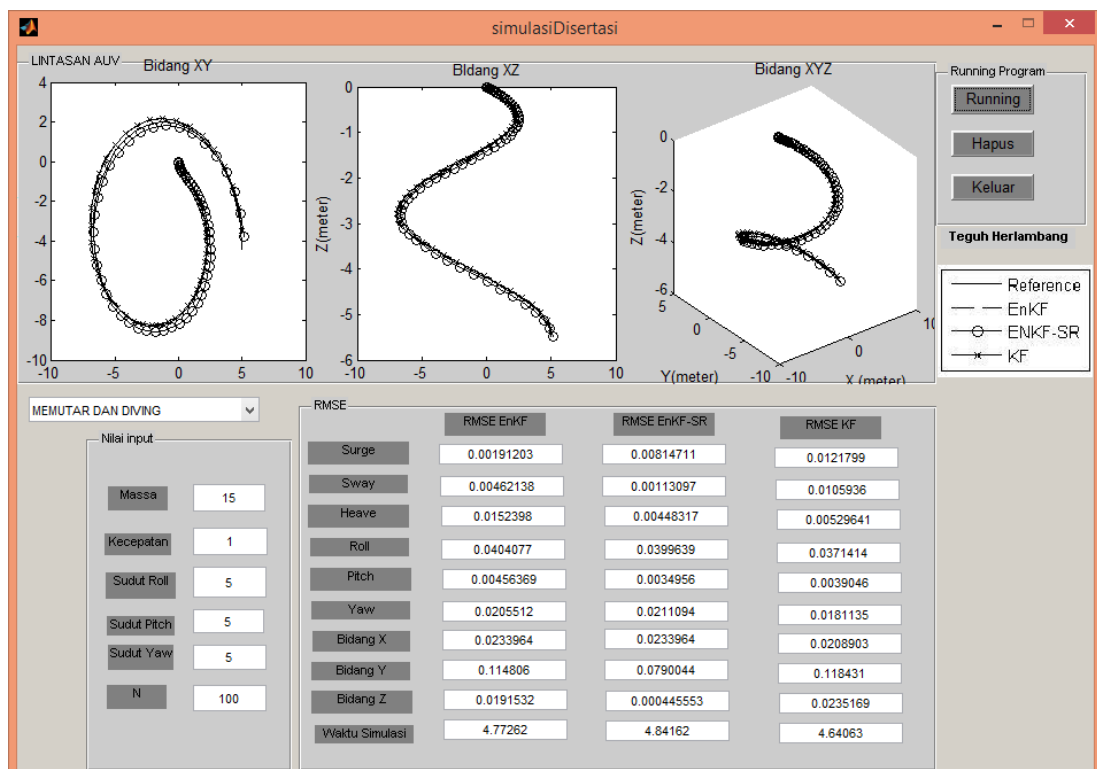
Gambar B5. GUI dari Lintasan Ketiga



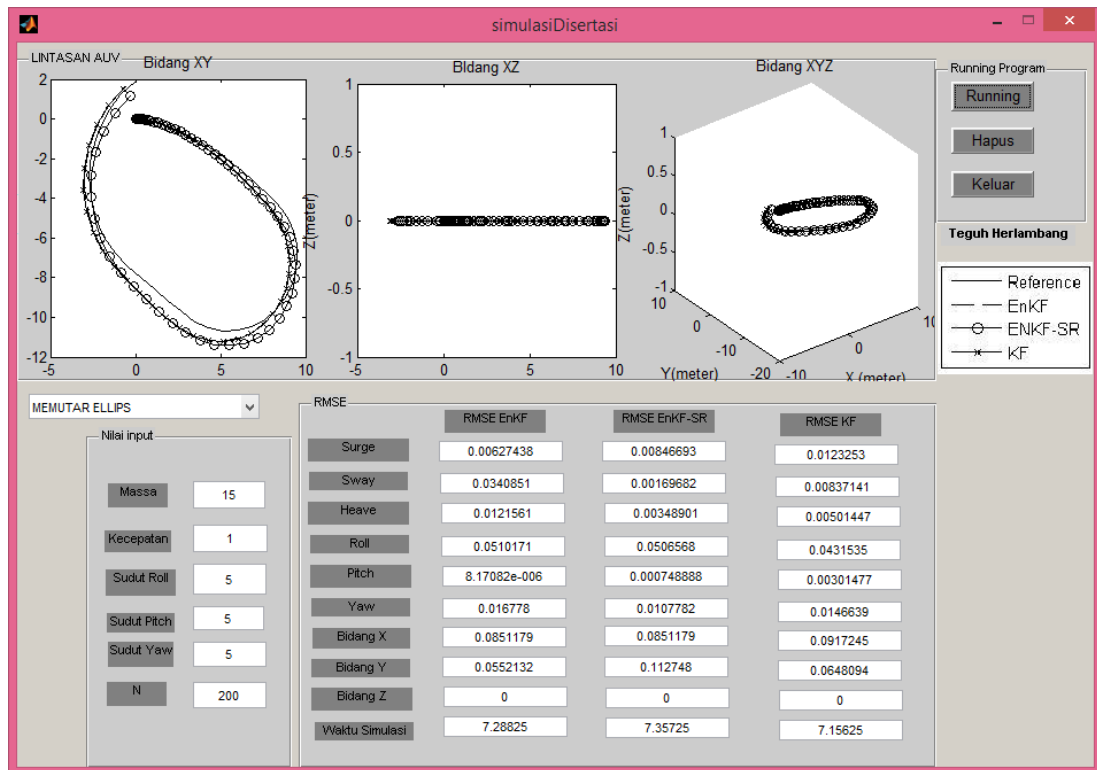
Gambar B6. GUI dari Lintasan Keempat



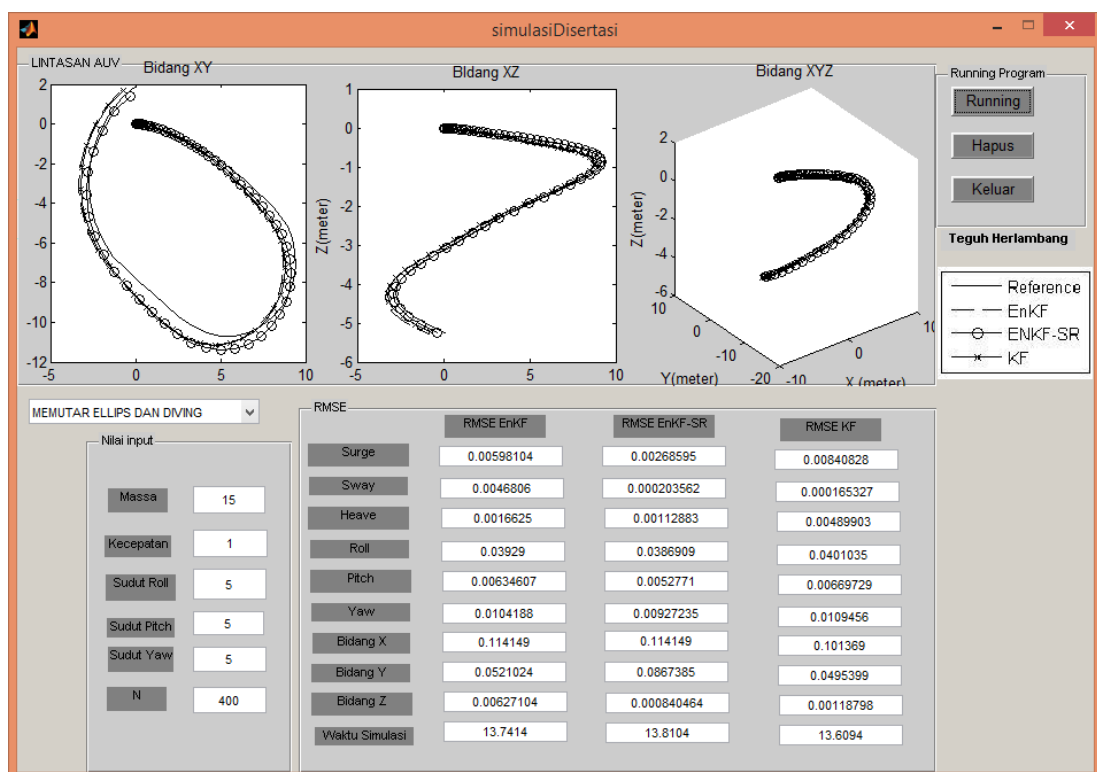
Gambar B7. GUI dari Lintasan Kelima



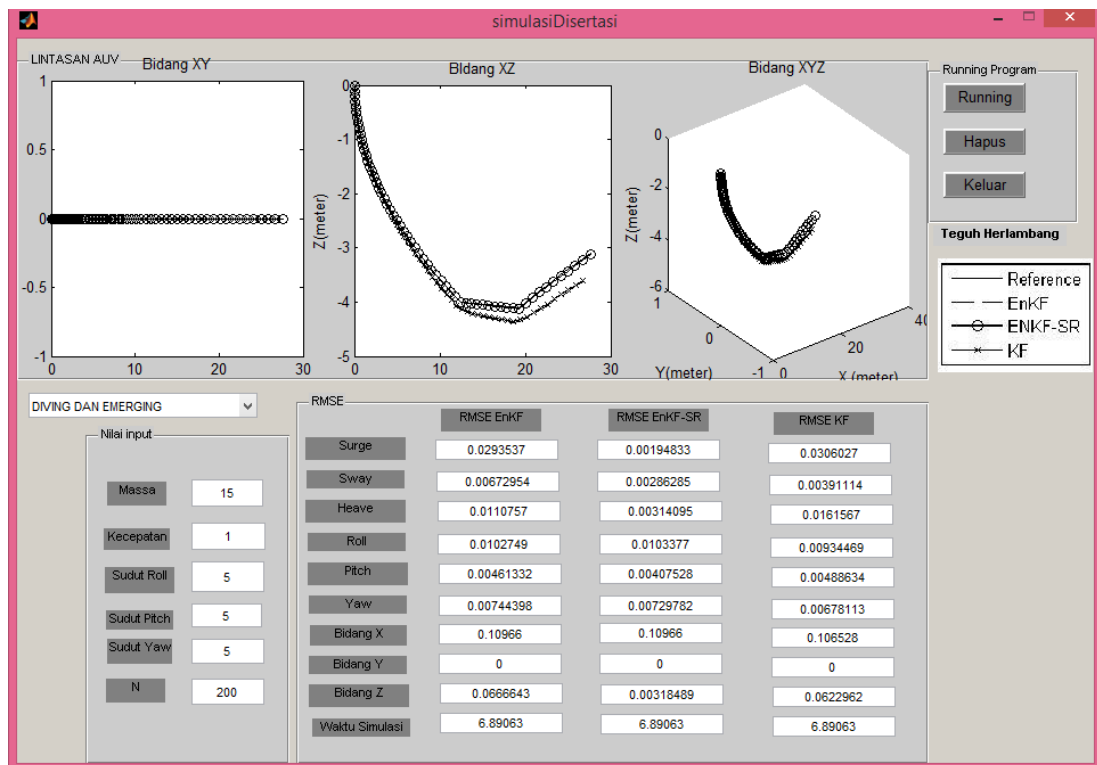
Gambar B8. GUI dari Lintasan Keenam



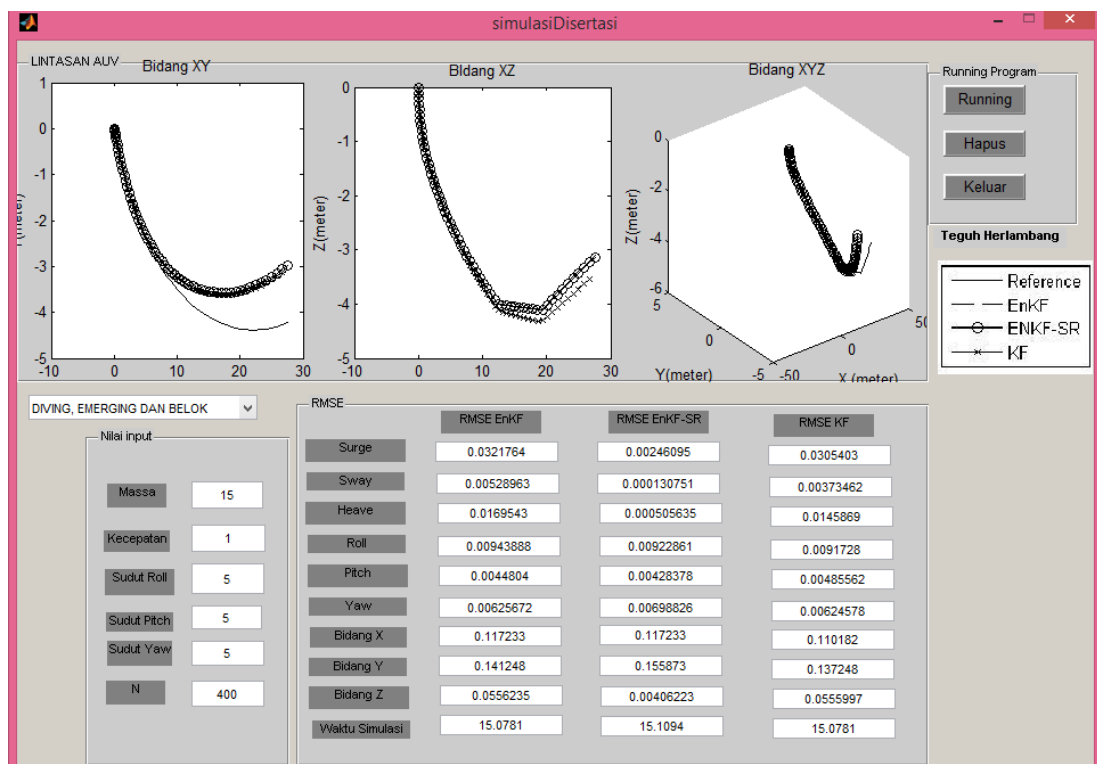
Gambar B9. GUI dari Lintasan Ketujuh



Gambar B10. GUI dari Lintasan Kedelapan



Gambar B11. GUI dari Lintasan Kesembilan



Gambar B12. GUI dari Lintasan Kesepuluh

LAMPIRAN C

Pembuktian Kprop

Pembuktian bahwa AUV tidak akan rolling dapat dibuktikan dengan perbandingan rasio torsi maksimal propeller : torsi minimal AUV.

1. Torsi maksimal propeler = $9.55 \frac{P}{n}$

dimana $V = 12$ volt, $I = 1.2$ A dan $n = 2000$ rpm

sehingga didapatkan $\frac{9.55 \cdot 12 \cdot 1.2}{2000} \text{ KNm} = 0.06876 \text{ KNm} = 68.76 \text{ Nm}$

2. Torsi minimal AUV = gaya \times keliling AUV

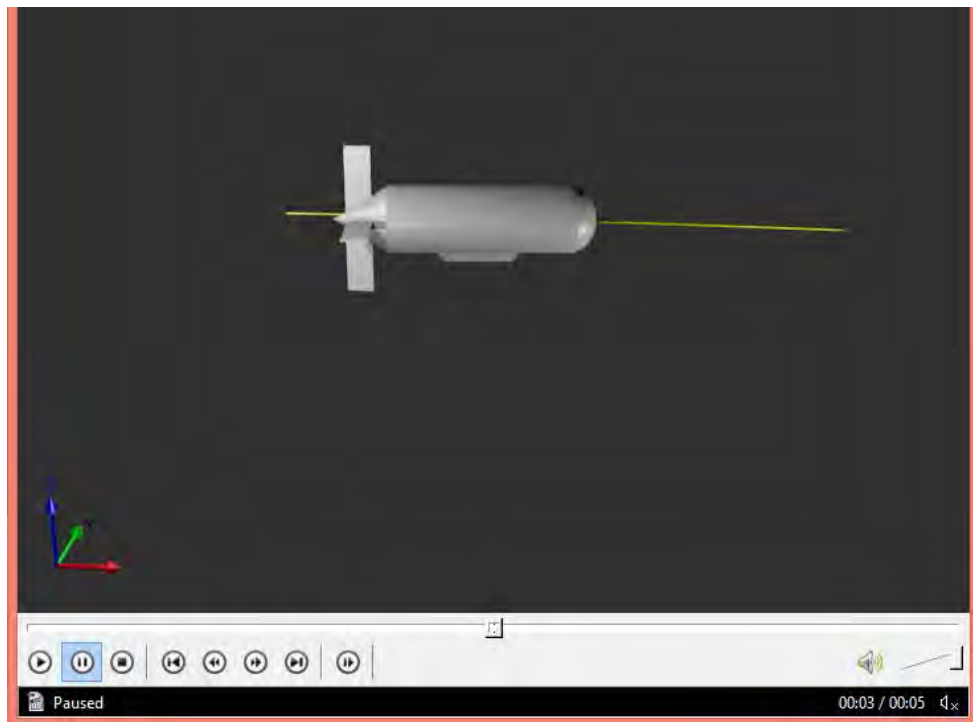
Dimana $m = 15$ kg, $a = 10 \frac{m}{s^2}$ dan keliling = πd

Sehingga didapatkan $= 15 \cdot 10 \cdot 3.14 \cdot 22 = 10.362 \text{ Nm}$

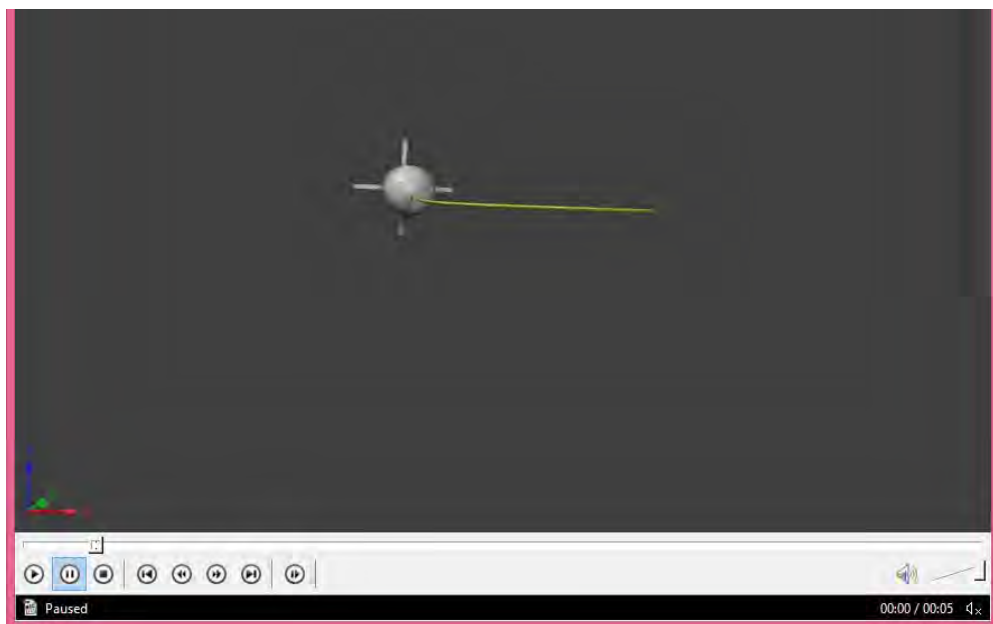
Jadi dari perhitungan di atas menunjukkan bahwa torsi maksimal propeller tidak akan bisa mendekati torsi minimal AUV dan rasionya sangat jauh sehingga AUV tidak akan rolling.

LAMPIRAN D

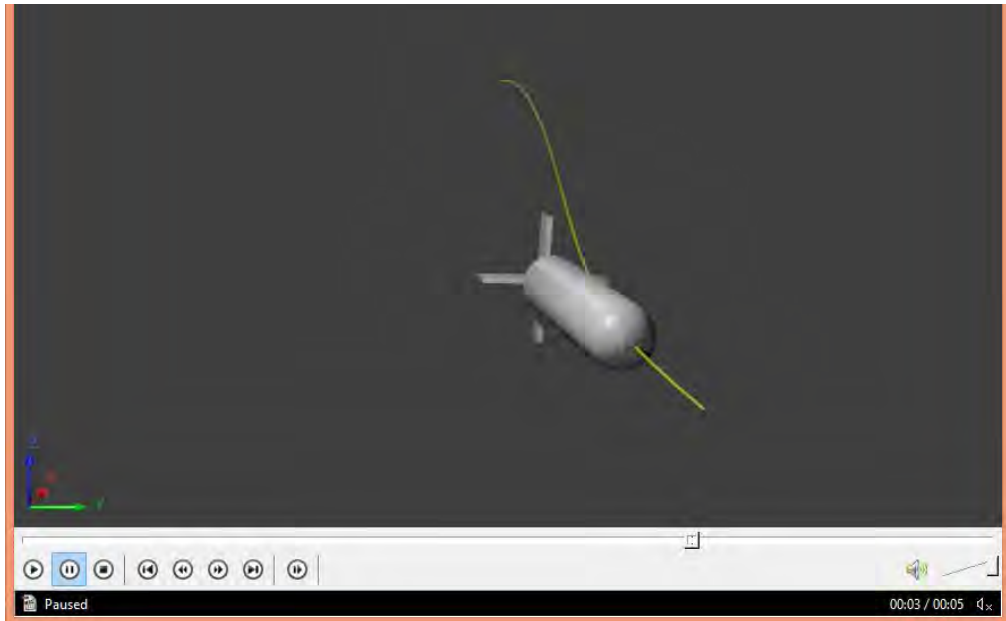
Potongan Video Representasi Simulasi 10 Lintasan



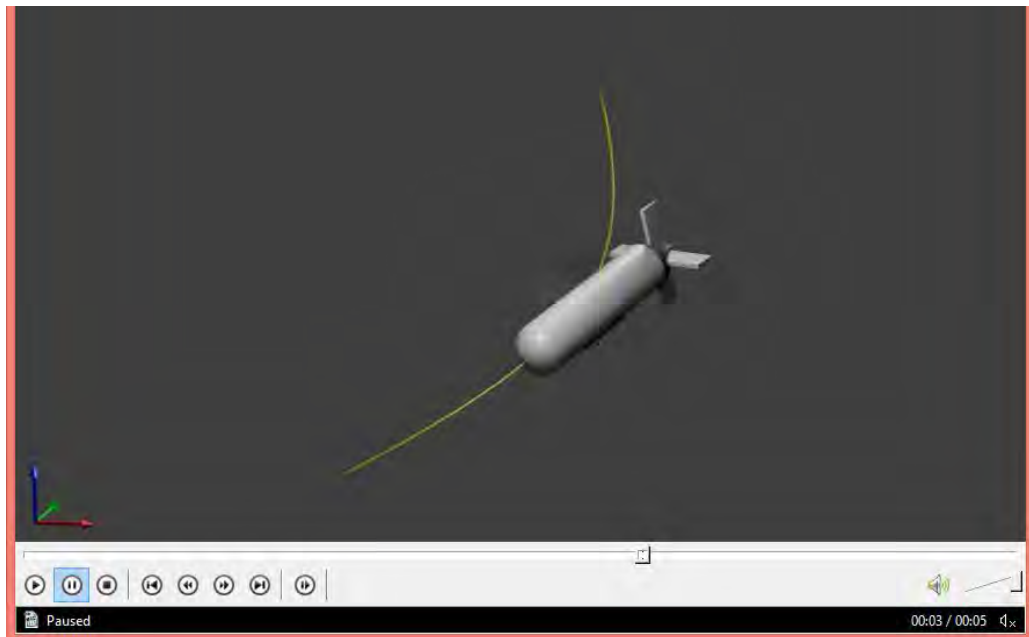
Gambar D1. Potongan Video Representasi dari Lintasan Pertama



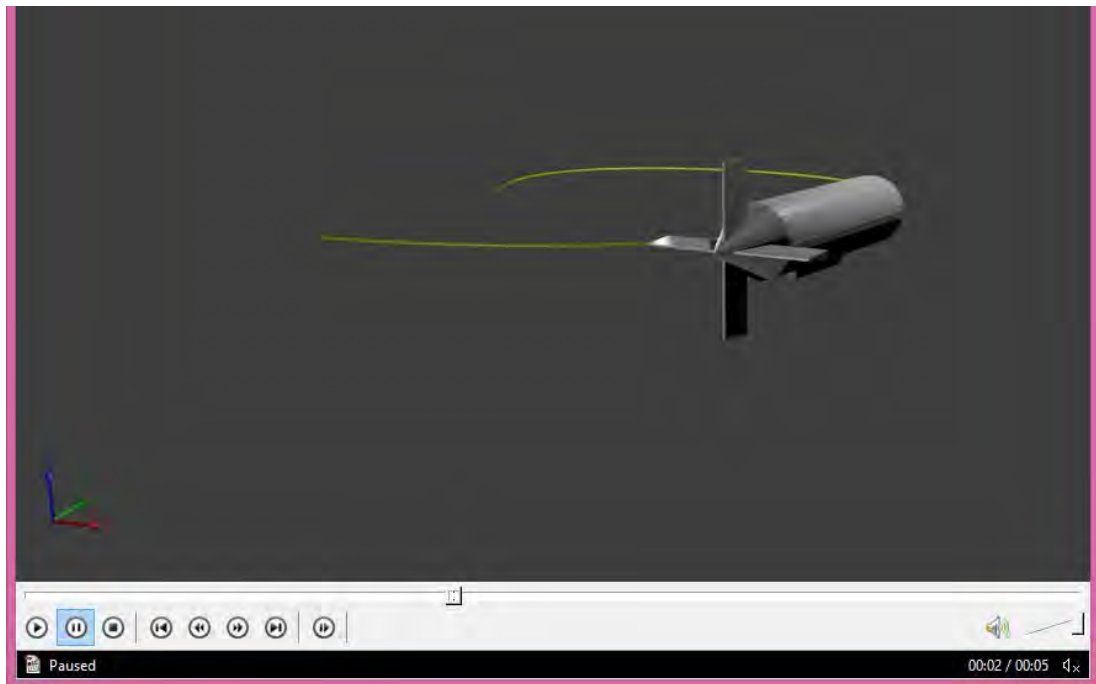
Gambar D2. Potongan Video Representasi dari Lintasan Pertama



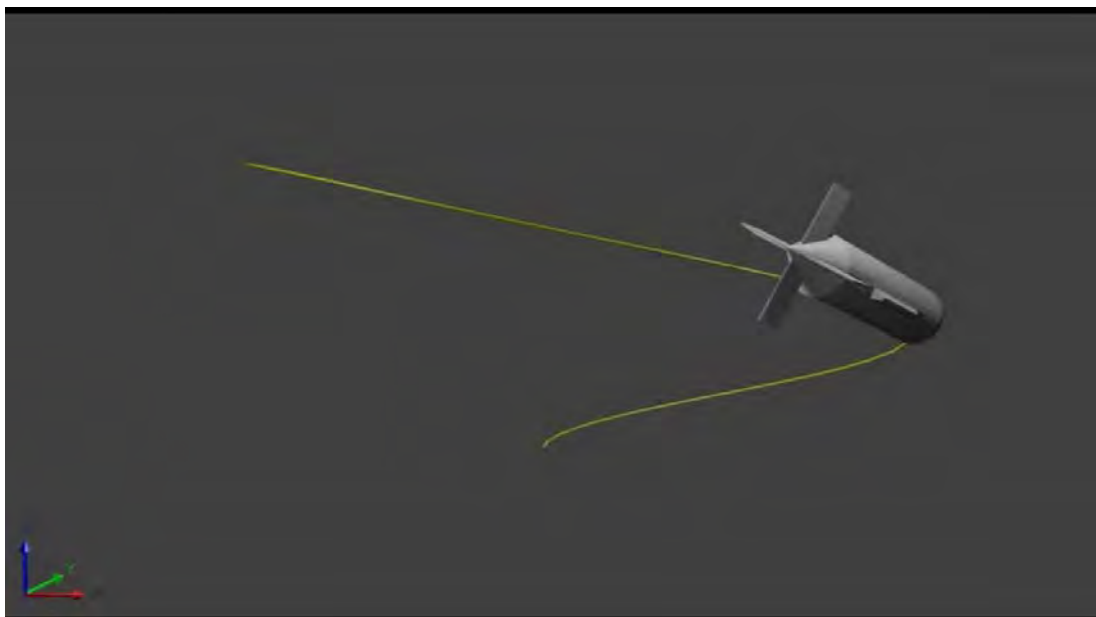
Gambar D3. Potongan Video Representasi dari Lintasan Ketiga



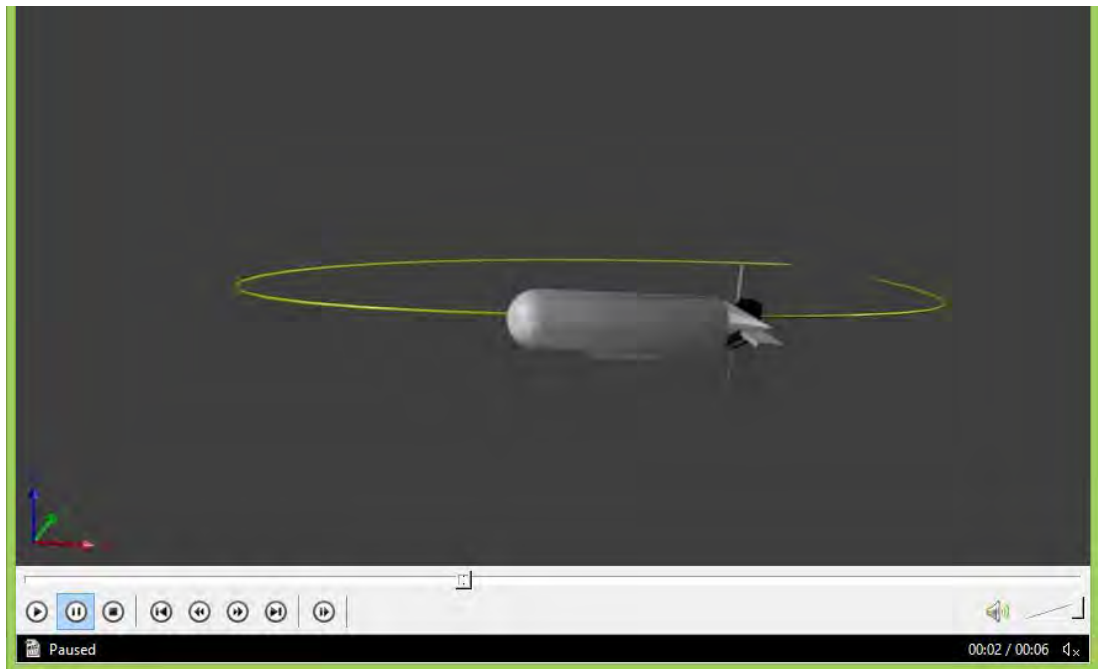
Gambar D4. Potongan Video Representasi dari Lintasan Keempat



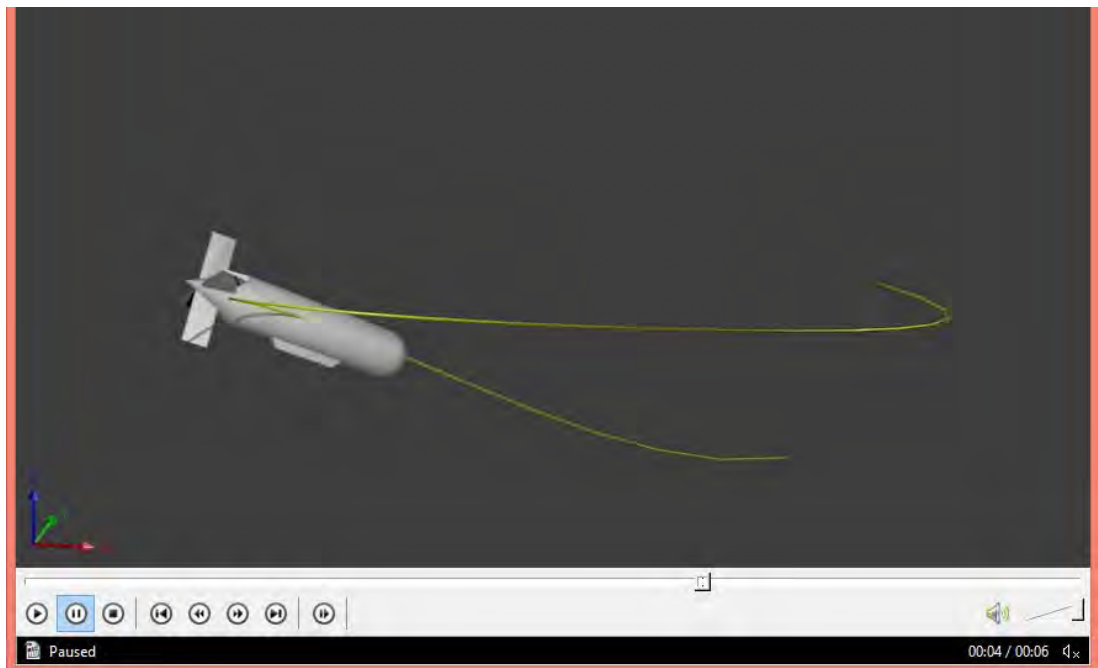
Gambar D5. Potongan Video Representasi dari Lintasan Kelima



Gambar D6. Potongan Video Representasi dari Lintasan Keenam



Gambar D7. Potongan Video Representasi dari Lintasan Ketujuh



Gambar D8. Potongan Video Representasi dari Lintasan Kedelapan



Gambar D9. Potongan Video Representasi dari Lintasan Kesembilan



Gambar D10. Potongan Video Representasi dari Lintasan Kesepuluh

LAMPIRAN E

DOKUMEN PUBLIKASI

PUBLIKASI JURNAL ILMIAH INTERNASIONAL :

Tahun	Judul Publikasi
2015	Teguh Herlambang , Eko Budi Djatmiko, Hendro Nurhadi, Ensemble Kalman Filter with a Square Root Scheme (EnKF-SR) for Trajectory Estimation of AUV SEGOROGENI ITS, <i>International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)</i> , Vol. 9, N. 6. ISSN 1970 – 8734. November 2015

PUBLIKASI SEMINAR ILMIAH INTERNASIONAL :

Tahun	Judul Publikasi
2014	Teguh Herlambang , Eko Budi Djatmiko, Hendro Nurhadi, Optimization with Jacobian Approach for ITS AUV System, The 9 th International Conference on Marine Technology, Surabaya, Indonesia, 24-26 Oktober 2014.
2015	Teguh Herlambang , Eko Budi Djatmiko, Hendro Nurhadi, Navigation and Guidance Control System of AUV with Trajectory Estimation of Linear Modelling, <i>International Conference on Advance Mechatronics, Intelligent Manufactre, and Industrial Automation (ICAMIMIA)</i> -IEEE, Surabaya Indonesia, 15 – 16 Oktober 2015.
2015	Kresna Oktafianto, Teguh Herlambang , Mardliah, Hendro Nurhadi, Design of Autonomous Underwater Vehcle Motion Control Using Sliding Mode Control Method, <i>International Conference on Advance Mechatronics, Intelligent Manufactre, and Industrial Automation (ICAMIMIA)</i> -IEEE Surabaya Indonesia, 15 – 16 Oktober 2015
2015	Zunif Ermayanti, Erna Apriliani, Hendro Nurhadi, Teguh Herlambang . Estimate and Control Position Autonomous Underwater Vehicle Based on Determined Trajectory using Fuzzy Kalman Filter Method, <i>International Conference on Advance Mechatronics, Intelligent Manufactre, and Industrial Automation (ICAMIMIA)</i> -IEEE Surabaya Indonesia, 15 – 16 Oktober 2015.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian tentang model linier gerak AUV dalam 6-DOF serta sistem navigasi, panduan dan kendali gerak, yang disarikan dari hasil pembahasan dalam bab 4, dapat disimpulkan beberapa hal, sebagai berikut:

- a. Dari hasil dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa model nonlinier 6-DOF AUV dapat dilinierkan sehingga didapatkan model linier. Model linier tersebut sudah terkontrol dan teramati.
- b. Pengembangan sistem navigasi dan panduan dengan metode Ensemble Kalman Filter (EnKF), Ensemble Kalman Filter Square Root (EnKF-SR) dan Kalman Filter (KF) pada model linier dari AUV dapat dilakukan dengan tingkat akurasi yang tinggi dan dengan rata-rata error 0.1% – 0.99%. Metode EnKF-SR memiliki tingkat akurasi yang lebih baik daripada EnKF dan KF untuk kesepuluh lintasan. Metode EnKF-SR dengan membangkitkan 300 ensemble memiliki rata-rata akurasi lebih baik daripada membangkitkan 100, 200 atau 400 ensemble.
- c. Pengembangan sistem kendali gerak dengan metode PID, SMC dan SPID pada model linier dari AUV dapat dilakukan, namun untuk PID terdapat error cukup besar dan *settling time* yang cukup lama sekitar 60 – 80 sekon. Untuk SMC dan SPID memiliki error yang kurang dari 5 % dan memiliki *settling time* yang cukup cepat sekitar 1 detik. Metode SMC memiliki kestabilan yang lebih baik dengan error yang lebih kecil daripada SPID atau PID. Baik secara error, settling time, delay time dan maksimum overshoot memiliki nilai lebih baik daripada SPID dan PID.

Kesimpulan yang merupakan capaian dari hasil dan pembahasan yang telah dipaparkan adalah sebagai berikut :

1. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ketiga metode tersebut untuk model linier memiliki tingkat akurasi yang tinggi pada sepuluh lintasan dan dengan

rata-rata error posisi untuk kesepuluh lintasan antara 0.1% – 0.99%. Dari pengamatan tampak keakurasian dari ketiga metode diatas dapat disimpulkan bahwa implementasi dari metode-metode tersebut pada suatu platform dapat dilakukan.

2. Hasil simulasi untuk sistem navigasi dan panduan terdiri dari sepuluh lintasan dengan membangkitkan 300 ensemble. Sedangkan dengan membangkitkan 100, 200 dan 400 ensemble pada lintasan pertama sampai lintasan kesepuluh yang paling akurat yaitu metode EnKF-SR.

Rata-rata error posisi pada lintasan pertama sampai lintasan kesepuluh dapat dituliskan pada Tabel 5.1 sebagai berikut:

Tabel 5.1. Rata-rata Error Posisi

Lintasan	Rata-rata Error Posisi
Pertama (lurus)	0.2 – 0.3 %.
Kedua (belok)	0.2 – 0.4 %.
Ketiga (diving)	0.05 – 0.3 %.
Keempat (belok diving)	0.01 – 0.4 %.
Kelima (memutar)	0.2 – 0.9 %.
Keenam (memutar diving)	0.001 – 0.86 %
Ketujuh (memutar ellips)	0.2 – 0.8 %
Kedelapan (memutar ellips diving)	0.005 – 0.92 %
Kesembilan (diving emerging)	0.1 – 0.8 %
Kesepuluh (diving emerging belok)	0.05 – 0.7 %.

3. Hasil simulasi dari kesepuluh lintasan menunjukkan bahwa metode EnKF-SR mempunyai rata-rata error gerak translasi, gerak rotasi dan posisi yang lebih akurat daripada metode KF dan EnKF untuk kesepuluh lintasan.
4. Hasil simulasi menunjukkan bahwa SMC dan SPID mempunyai error yang tidak jauh berbeda dan kurang dari 5% serta memiliki *settling time* yang cukup cepat sekitar 1 sekon.

5. Hasil dari SMC dan SPID jauh lebih stabil daripada PID karena PID mempunyai error yang lebih besar dan *settling time* yang lama sekitar 60 – 80 sekon.
6. Analisa kestabilan Lyapunov dapat menunjukkan bahwa sistem kendali SMC, PID dan SPID stabil asimtotik global.
7. Perhitungan koefisien hidrodinamika sebagai validasi secara numerik bahwa sistem navigasi, panduan dan kendali gerak dapat digunakan untuk AUV sehingga bisa dijadikan desain parameter untuk AUV dengan dimensi yang berbeda
8. Visualisasi dari kajian numerik sistem navigasi, panduan dan kendali gerak dan kekonvergenan dari sistem kendali dapat dijadikan sebagai performance test untuk AUV sebelum dilakukan eksperiment.

5.2 SARAN

Saran-saran diajukan demi kelanjutan dan penyempurnaan penelitian yang disampaikan pada disertasi ini, antara lain:

1. Perlu dikembangkan model non-linier 6-DOF dengan sistem navigasi, panduan dan kendali gerak.
2. Perlu dikembangkan sistem navigasi, panduan dan kendali gerak AUV yang full terintegrasi
3. Perlu dikembangkan *cross couple control* untuk full integrasi sistem navigasi, panduan dan kendali gerak AUV.
4. Perlu dikembangkan metode control untuk sistem ballast control.
5. Perlu dikembangkan sistem navigasi, panduan dan kendlai gerak AUV dengan lebih banyak macam lintasan.
6. Perlu dikembangkan sistem navigasi, panduan dan kendali gerak yang full integrasi dengan AUV yang diuji tingkat keakurasiannya ketika AUV beroperasi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Apriliani, E., dan Sanjaya, B.A., 2007, *Reduksi Rank pada Matriks-Matriks Tertentu*, Laporan Penelitian Hibah Pasca, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Akcaya, H., Yildiz, H.A., Saglam, G., and Gurleyen, F., 2009, "Sliding Mode Control of Autonomous Underwater Vehicle". *Proc. of International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, ELECO 2009., Bursa, Turkey, Nov 5-8.
- An, P.E., Healey, A.J., Park, J. and Smith, S.M., 1997, Asynchronous Data Fusion for AUV Navigation via Heuristic Fuzzy Filtering Techniques, *Proc. of International Conference OCEAN 1997*, Vol. 1, pp. 397-402, Halifax, Canada, Oct. 6-9
- Andonian, M., Cazzaro, D., Invernizzi, L., Chyba, M., and Grammatico, S., 2010, "Geometric Control for Autonomus Underwater Vehicle Overcoming a Thruster Failure", *Proc. of 49th IEEE Conference on Decision and Control*, Atlanta, GA, USA, Dec. 15-17
- Armstrong, B.E. Wolbrecht, D. Edwards, B., 2010, "AUV Navigation in the Presence of a Magnetic Disturbance with an Extended Kalman Filter", *Proc. of International Conference OCEAN 2010*, Sydney, Australia
- Ataei, M., and Koma, A.Y., 2015, "Three-dimensional optimal path planning for waypoint guidance of an autonomous underwater vehicle", *Robotics and Autonomous Systems Journal*, Elsevier, Vol 67, pp. 23-32, May
- Barisic, M., Vasilijevic, A., and Nad, D., 2012, "Sigma-Point Unscented Kalman Filter Used For AUV Navigation", *Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, Barcelona, Spain, July 3-6
- Bartolini, G., Cisci, L., Pisano, A., and Usai, E., 2009, "Navigation and Control of AUVs via Second Order Sliding-Modes and Extended Kalman Filtering", *Proc. of the 9th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation*, Dubrovnik, Croatia, June 27-29
- Chiu, F.C., Guo, J., Huang, C.C., and Tsai, W.C., 2000, "Application of the Sliding Mode Fuzzy Controller to the Guidance and Control of an Autonomous Underwater Vehicle", *Proc. of International Symposium on Underwater, IEEE Technology*, Tokyo, Jepang, pp. 181-186

- Craven P.J., Sutton, R., Burns, R.S., and Dai, Y.M., 2010, "Multivariable Intelligent Control Strategies for an Autonomous Underwater Vehicle, *International Journal of Systems Science*, Vol 30. No. 9, pp. 965-980
- Evensen, G (2009), "*Data Assimilation The Ensemble Kalman Filter (second edition)*", Springer-Verlag Berlin Hiedelberg London and New York
- Fauske, K.M et al. 2007, "Estimation of AUV Dynamics for Sensor Fusion". *Proc. of International Conference on Information Fusion*, Quebec, Canada, July 9-12
- Forouzantabar, A., Gholami, B., and Azadi, M., 2012, "Adaptive Neural Network of Autonomus Underwater Vehicle", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 67, pp. 304-309
- Fossen, T. I. 2005, "A Nonlinear Unified State-space Model for Ship Maneuvering and Control in A Seaway". *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 5, pp. 2717-2746, Aug
- Fulton, T.F. and Cassidy, C.J., 2001, "Navigation Sensor Data Fusion for the AUV Remus", *Marine Technology*, SNAME, Vol. 38, No. 1, January, pp. 65–69
- Garcia, R., Puig, J., Ridao, P., and Cufi, X. 2002, "Augmented State Kalman Filtering for AUV Navigation". *Proc. of International Conference on Robotics and Automation*, ICRA 2002, IEEE, Vol. 4, pp. 4010 – 4015
- Golub, H.G., dan Loan, V.F., 1993, "*Matrix Computations (second edition)*", The John Hopkins University Press, Baltimore and London.
- Guo, J. F. Chiu, C., and Huang, C., 2003, "Design of a Sliding Mode Fuzzy Controller for The Guidance and Control of an Autonomous Underwater Vehicle", *Ocean Engineering*, Elsevier, Vol.30, Issue 16, pp. 2137–2155, Nov
- Hasbullah, H., 2011, "Algoritma Adaptive Covariance Rank Unscented Kalman Filter untuk Estimasi Ketinggian dan Kecepatan Aliran Sungai", *Tesis Magister Jurusan Matematika FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, Surabaya.
- He, B., Zhang, H., Li, C., Zhang, S., Liang, Y., and Yan, T., 2011, "Autonomous Navigation for Autonomous Underwater Vehicle Based on Information Filters and Active Sensing", *Sensor* 2011, Vol. 11, pp. 10958-10980
- Healey, A.J., 2002, "Guidance and Control, For Small AUVs Using DGPS and Dopplers Aided Inertial Underwater Navigation", *AAIA Guidance Navigation and Control Conference and Exhibit*, Monterey, California, Aug. 5-8
- Herlambang, T. (2010), "Desain Pengendalian Ketinggian Air dan Temperatur Uap pada Sistem Steam Drum Boiler dengan Metode Sliding Mode Control", *Tugas*

Akhir, Jurusan Matematika FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya.

- Herlambang, T. (2012), “Akar Kuadrat Ensembel Kalman Filter (AK-EnKF) untuk Estimasi Posisi Peluru Kendali”, *Tesis Magister*, Jurusan Matematika FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Herlambang, T., Nurhadi H and Subchan., 2014a. “Preliminary Numerical Study on Designing Navigation and Stability Control Systems for ITS AUV”, *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications, Switzerland. Vol. 49, pp. 420-425
- Herlambang, T., Djatmiko E.B and Nurhadi H., 2014b, “Optimization with Jacobian Approach for ITS AUV System”, *Proc. of The 9th International Conference on Marine Technology*, MARTEC 2014, Surabaya, Indonesia, Oct. 24-25
- Herlambang, T., Djatmiko E.B and Nurhadi H., 2015. “Navigation and Guidance Control System of AUV with Trajectory Estimation of Linear Modelling”, *Proc. of International Conference on Advance Mechatronics, Intelligent Manufactre, and Industrial Automation*, IEEE , ICAMIMIA 2015, Surabaya, Indonesia, pp. 184-187, Oct 15 – 17
- Herlambang, T., Djatmiko E.B and Nurhadi H., 2015, “Ensemble Kalman Filter with a Square Root Scheme (EnKF-SR) for Trajectory Estimation of AUV SEGOROGENI ITS”, *International Review of Mechanical Engineering IREME Journal*, Vol. 9, No. 6. Pp. 553-560, ISSN 1970 – 8734. Nov
- Hoerner, S.F., 1965, “Fluid Dynamic drag”. *Published by author*.
- Jalving, B., and Storkersen, N., 1994, “The Control System of an Autonomous Underwater Vehicle,” *Proc. of the Third IEEE Conference*, Vol. 2, pp. 851 – 856, Aug. Glasgow, Scotland
- Jantapremjit, P., and Wilson, P.A., 2008, “Control and Guidance Approach using Autonomous Underwater Vehicle”, *International Journal of Maritime Engineering*, Vol 150, pp. 1-12
- Kalman, R.E., 1960. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *ASME Journal of Basic Engineering*, Vol 82, pp. 35-45
- Kalyan, B., and Balasuriya, A., 2004, “Multiple Sensors based Navigation Scheme for AUV Position Estimation”, *Proc. of International Symposium on Underwater Technology*, Taipei, pp. 201-207, Apr, 20-23

- Kanakakis, V., Tsourveloudis, N.C., and Valavanis, K.P., 2001, “Design and Testing of Fuzzy Logic Controller for an AUV”, *Proc. of Workshop on Underwater Robotics for Sea Exploration and Environmental Monitoring*, Rio de Janeiro, Brazil.
- Kim, K., and Ura, T., 2002, “3-Dimensional Trajectory Tracking Control of an AUV R-One Robot Considering Current Interaction”, *Proc. of The 12th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kitakyushu, Japan, May 26-31
- Kim, K., and Choi, H.S., 2007, “Analysis on the Controlled Nonlinear Motion of a Test Bed AUV-SNUUV 1”, *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 1138–1150
- Kim, K., and Ura, T., 2012, “Optimal Guidance for Autonomous Underwater Vehicle Navigation within Undersea Areas of Current Disturbances”, *Advanced Robotics Journal*, Vol 23, pp. 601-628
- Kondo, H., and Ura, T., 2004, “Navigation of an AUV for Investigation of Underwater Structures”, *Control Engineering Practice*, Elsevier, Vol.12, pp. 1551–1559
- Lamnas, A.K., Samuut, K., and He, F., 2007, “A 6 DOF Navigation Algorithm for Autonomous Underwater Vehicle”, *Proc. of International Conference OCEANS 2007*, Aberdeen, Skotlandia, June. 18-21
- Lapierre, L., and Soesanto, D., 2007, “Nonlinear Path-Following Control of an AUV”, *Ocean Engineering*, Elsevier, Vol. 34, pp. 1734–1744
- Lapierre, L., et al., 2008, “Robust Nonlinear Path-Following Control of an AUV”. *Journal of Ocean Engineering*, IEEE. Vol. 33, Issue-2, pp. 89-102
- Lapierre, L. 2009, “Robust Diving Control of an AUV”, *Journal of Ocean Engineering*, Elsevier, Vol. 36, pp. 92–104.
- Lewis, L Frank. (1986), “*Optimal Estimation, With An Introduction To Stochastic Control Theory*”, John Wiley and Sons, New York.
- Li, J.H., and Lee, P.M., 2005, “Design of an Adaptive Non-linear Controller for Depth Control of an Autonomous Underwater Vehicle”, *Ocean Engineering*, Elsevier, Vol. 32, pp. 2165–2181.
- Loebis, D Sutton, R, Chudley, J, Naeem, W. 2004, “Adaptive Tuning of a Kalman Filter via Fuzzy Logic for an Intelligent AUV Navigation System”, *Control Engineering Practice*, Elsevier, Vol. 12, pp. 1531–1539
- Luque, K.C.C, 2011, “AUV Identification and Robust Control”, *18th IFAC World Congress*, Vol.18, part 1, pp. 14735-14741, Milan, Italy

- McGann, C., Frederic, P.Y, Rajan, K., Ryan, J., and Henthorn, R., 2008 “Adaptive Control for Autonomous Underwater Vehicles”, Proc. of Twenty-Third AAIA Conference on Artificial Intelligence, Chicago, USA
- Naeem, W., 2002, “Model Predictive Control of an Autonomous Underwater Vehicle”. *Proc. of UKACC 2002 Postgraduate Symposium*, Sheffield, UK, Sept.
- Naik, M.S., and Singh, S.N., 2007, “State Dependent Riccati Equation Based Robust Dive Plane Control of AUV with Control Constraints”, *Ocean Engineering*, Elsevier, Vol. 34, pp. 1711–1723
- Nurhadi H., and Tarn Y.S, 2011, “Experimental PC based TGPID control method for 2D CNC Machine”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, pp. 8949–8962
- Nurhadi, H., Subchan, and Gustiyadi, F.R., 2012, “Design of Position Estimation Algorithm of Navigation and Trajectory System for Unmanned Underwater Vehicle ITS AUV-01 using Ensemble Kalman Filter (EnKF) Method”, *13th Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (SITIA 2012)*, Surabaya, Indonesia, May 23
- Ogata, K., 2010, *Modern Control Engineering Fifth Edition*, Prentice Hall, New Jersey.
- Pakpahan, S.1987.*Kontrol Otomatik:Teori dan Penerapan*. Jakarta: Erlangga
- Palmer, A.R., et al., 2009, “A Theoretical Approach to Facilitating Transition Phase Motion in a Postively Bouyant Autonomous Underwater Vehicle”, *The Royal Institution of Naval Architects Journal*, Vol. 151, Part 43, Jul-Sep
- Panish, R. and Taylor, M., 2011, “Achieving High Navigation Accuracy Using Inertial Navigation Systems in Autonomous Underwater Vehicle”. *Proc. of OCEANS 2011*, IEEE, Santander, Spanyol, June. 6-9
- Paull, L., Saeedi, S., Seto, M., and Li, H., 2014, “AUV Navigation and Localization: A Review”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 39, No 1, Jan.
- Perruquetti, W., and Barbot, J.P., 2002, “*Sliding Mode Control in Engineering*”. New York: Marcel Dekker, Inc
- Petrich, J, and Stilwell, D.J. 2010, “Model Simplification for AUV Pitch-Axis Control Design”. *Ocean Engineering*, Elsevier, Vol. 37, Issue 7, pp. 638–651, May.
- Prestero, T., 2001, *Verification of Sic-Degee of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Uderwater Vehicle*, Massachusetts Intitute of Technology

- Repoulas, F., and Papadopoulos, E., 2005, "Trajectory Planning and Tracking Control of Underactuated AUVs*", *Proc. of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, ICRA 2005, Barcelona, Spain, Apr. 18-22
- Repoulas, F., and Papadopoulos, E., 2007, "Three Dimensional Trajectory Control of Underactuated AUVs", *Proc. of the European Control Conference*, Kos, Greece, July 2-5
- Rezazadegan, F., Shojaei, K., and Chatraei, A., 2013, "Design of an Adaptive Nonlinear Controller for an Autonomous Underactuated Underwater Vehicle". *Proc. of International Conference on Electrical, Electronics, Communications and Photonics*, Vol.2, Issue 2
- Rhif, A., 2011, "Review Note for Position Control of an Autonomous Underwater Vehicles", *Technical Review*, IEEE. Vol. 28, Issue 6, Nov. – Dec.
- Subiono. 2010. *Matematika Sistem*. Jurusan Matematika FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
- Shi, J., 2006, "Design of Sliding Mode Autopilot with Steady State Error Estimation for AUV", *Proc. of TENCON 2006*, IEEE, Hongkong, China, Nov. 14-17
- Slotine, E., and Li, W., 1991, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey USA
- Sun, Y.C., and Cheah, C.C., 2009, "Adaptive Control Schemes for Autonomous Underwater Vehicles", *Robotica*, Vol 27, pp. 119-129
- Tang, Z., et al., 2012, "Predictive Fuzzy PID Control Method for Underwater Vehicles", *Journal of Computational Information System*, Vol. 8, No 9, pp. 3635-3642
- Wang, L.J., et al., 2008, "Tracking Control of Autonomous Underwater Vehicles with Internal Moving Mass", *Acta Automatica Sinica*, Vol. 31, No. 10, Oct.
- Wu, X., Feng, Z., Zhu, J., and Allen, R., 2008, "GA-Based Path planning for multiple AUVs", *International Journal of Control*. Vol. 80, Issue-7, pp. 1180-1185
- Yang, C. 2007. *Modular Modelling and Control for Autonomous Vehicle (AUV)*. Department of Mechanical Engineering National University of Singapore
- Yin, B., XueSong, P, Yu, C., and Liu, B. 2010, "An AUV Integrated Navigation Method Based on Improved Genetic Neural Network", *Proc. of International Conference on Artificial Intelligent and Education*, ICAIE 2010, Hangzhou, China, Oct. 29-30

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



I. DATA DIRI

Nama Lengkap & Gelar : Teguh Herlambang, S.Si., M.Si.
Tempat, Tanggal Lahir : Surabaya, 22 November 1987
Alamat Rumah : Jalan Bumisari Praja II no 7, Sambikerep, Candi Lontar, Surabaya
Unit Kerja / Instansi : Universitas Nahdlatul Ulama Surabaya (UNUSA)
Jl. Jemursari no 51 – 57 Surabaya
NIDN : 0722118701
Alamat Email : teguh.ftkits@gmail.com
teguh@unusa.ac.id
HP : 085646040977

II. DATA KELUARGA

Istri : Ike Sopiya, Amd.Keb
Anak : 1. Unggul Doctorrizq Herlambang
2. Prestasia Doctorrizq Herlambang

III. RIWAYAT PENDIDIKAN

2000 : Lulus SDN Balongsari I / 500 Surabaya
2003 : Lulus SMP Negeri 26 Surabaya
2006 : Lulus SMA Negeri 11 Surabaya
2010 : Lulus Program Sarjana Jurusan Matematika, FMIPA ITS
2012 : Lulus Program Pascasarjana Jurusan Matematika, FMIPA ITS
2013-2016 : Program Doktor Pascarsarjana Fakultas Teknologi Kelautan, ITS

IV. KARYA TULIS

PUBLIKASI SEMINAR ILMIAH INTERNASIONAL :

Tahun	Judul Publikasi
2014	Teguh Herlambang , Eko Budi Djatmiko, Hendro Nurhadi, Optimization with Jacobian Approach for ITS AUV System, The 9 th International Conference on Marine Technology, Surabaya, Indonesia, 24-26 Oktober 2014.
2015	Teguh Herlambang , Eko Budi Djatmiko, Hendro Nurhadi, Navigation and Guidance Control System of AUV with Trajectory Estimation of Linear Modelling, <i>International Conference on Advance Mechatronics, Intelligent Manufactre, and Industrial Automation (ICAMIMIA)</i> Surabaya Indonesia, 15 – 16 Oktober 2015.
2015	Kresna Oktafianto, Teguh Herlambang , Mardiah, Hendro Nurhadi, Design of Autonomous Underwater Vehcle Motion Control Using Sliding Mode Control Method, <i>International Conference on Advance Mechatronics, Intelligent Manufactre, and Industrial Automation (ICAMIMIA)</i> Surabaya Indonesia, 15 – 16 Oktober 2015
2015	Zunif Ermayanti, Erna Apriliani, Hendro Nurhadi, Teguh Herlambang . Estimate and Control Position Autonomous Underwater Vehicle Based on Determined Trajectory using Fuzzy Kalman Filter Method, <i>International Conference on Advance Mechatronics, Intelligent Manufactre, and Industrial Automation (ICAMIMIA)</i> Surabaya Indonesia, 15 – 16 Oktober 2015.

PUBLIKASI JURNAL ILMIAH INTERNASIONAL :

Tahun	Judul Publikasi
2015	Teguh Herlambang , Eko Budi Djatmiko, Hendro Nurhadi, Ensemble Kalman Filter with a Square Root Scheme (EnKF-SR) for Trajectory Estimation of AUV SEGOROGENI ITS, <i>International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)</i> , Vol. 9, N. 6. ISSN 1970 – 8734. November 2015